

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

**GABRIEL CORREA BANDEIRA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

**CAROLINE RODRIGUES VAZ**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

**LUCILA MARIA DE SOUZA CAMPOS**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

## **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, gerando preocupação sobre o fim de sua vida útil e os possíveis resíduos gerados. Formas para resolver o problema vêm sendo pesquisadas.

## **Problema de Pesquisa e Objetivo**

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 Economia Circular. Ao considerar a problemática apresentada, 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.

## **Fundamentação Teórica**

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. Por estes motivos, alguns estudos se concentram na digitalização dos ecossistemas circulares, a fim de facilitar o engajamento entre os atores do ecossistema.

## **Metodologia**

Após a leitura e análise de 43 artigos, foram encontradas aplicações de diversas tecnologias digitais para a integração dos atores dentro de uma cadeia de valor. Tecnologias como Big Data, Blockchain, Cloud Computing, Digital Product Passport (DPP), Inteligência Artificial (IA), Internet of Things (IoT) e Tokens permitem a troca de informações para uma cadeia mais integrada, onde é possível aplicar com maior facilidade as práticas de Economia Circular.

## **Análise e Discussão dos Resultados**

Com as tecnologias digitais, um ator localizado no nível à montante pode visualizar se as placas solares fotovoltaicas recebem a destinação correta, assim como um instalador, no nível 'meio caminho', pode ter 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.

## **Considerações Finais**

Dessa forma, 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 fortalecimento das relações entre os atores e a garantia da implementação de práticas circulares.

## **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. 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. 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.

## **Palavras Chave**

ecossistema circular, cadeia de valor fotovoltaica, tecnologias digitais

## **Agradecimento a órgão de fomento**

Agradecemos, de forma especial, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido e pelas bolsas de estudo, que foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

# 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

No ano de 2024, a energia solar fotovoltaica atingiu a capacidade instalada de 2.2 terawatts (TW), a maior já registrada (IEA, 2025). Ao redor do mundo essa mesma energia apresenta crescimento por conta de suas diversas aplicações. No Japão, por exemplo, houve um aumento na utilização residencial nos últimos 14 anos (Memtimin; Wang; Mogi, 2025). Em áreas rurais do Sul da China, células fotovoltaicas têm sido utilizadas com mais frequência para obter economias financeiras, pois nesta região é consumida grande quantidade de energia por motivos de refrigeração (Xia *et al.*, 2024). Enquanto na Dinamarca a população acredita que a energia fotovoltaica é a principal tecnologia capaz de ajudar na mitigação das mudanças climáticas, principalmente se utilizada no contexto industrial (Ladenburg *et al.*, 2024).

No entanto, apesar de ser uma energia limpa, o descarte de placas solares fotovoltaicas 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.

Nesse sentido, percebe-se a necessidade do gerenciamento correto de painéis fotovoltaicos em fim de vida. Para Biyouki *et al.* (2024), 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. 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 dentro da indústria fotovoltaica.

Portanto, a economia circular é proposta como uma solução potencial para os desafios de fornecimento de materiais e da gestão do fim de vida útil (Mirlletz *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; Zaabi; Ghosh, 2024). Para Rabaia *et al.* (2024) um modelo holístico de economia circular para a cadeia fotovoltaica também pode auxiliar no alcance de metas de desenvolvimento sustentável e economia circular global, o que equilibra as complexidades tecnológicas e as demandas gerenciais.

Ao analisar a cadeia de valor fotovoltaica, ela pode ser dividida em três fases: a montante (*upstream*), meio caminho (*midstream*) e a jusante (*downstream*) (Garlet *et al.*, 2020). A montante é iniciada a produção da célula solar, que consiste desde a extração do silício, até a produção da placa em si; a meio caminho acontecem etapas como distribuição, instalação, operação, manutenção, desativação e desmontagem dos sistemas fotovoltaicos; a jusante ocorre a coleta, o *downcycling* e a recuperação parcial de materiais provenientes dos módulos fotovoltaicos (Nyffenegger *et al.*, 2024). Para garantir que a circularidade ocorra nesta cadeia, é necessário cooperação, apoio governamental, inovações tecnológicas e

incentivos econômicos na reciclagem de módulos fotovoltaicos (Radavicius; Groesser; Tvaronaviciene, 2025).

Os relacionamentos entre empresas, governo, instituições de pesquisa e outras partes interessadas são essenciais para a troca de informações e a valorização do conhecimento sobre a tecnologia fotovoltaica e a dinâmica do mercado (Garlet; Savian; Ribeiro, 2025). 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 economia circular (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”.

Portanto, em um ecossistema circular todas as partes interessadas relevantes ao longo da cadeia de fluxo de materiais devem ser consideradas para tornar a circularidade uma realidade (Pietrulla, 2022). A transição para esse ecossistema exige repensar os modelos de negócios existentes, a fim de permitir a dissociação entre criação de valor e consumo de recursos (Pieron; McAloone; Pigosso, 2019). Por isso, o sucesso dos ecossistemas circulares depende dos papéis e responsabilidades dos atores e de suas múltiplas partes interessadas e, entre esses atores, estão incluídos empresas focais, orquestradores, fornecedores, governo, catadores, clientes e consumidores (Aryee *et al.*, 2025).

Além disso, para alcançar este ecossistema, segundo Castillo-Ospina *et al.* (2025), 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. Rossi e Srai (2024) acreditam que um aspecto crítico dos ecossistemas circulares é a capacidade de rastrear e gerenciar recursos para garantir a disponibilidade de estoque e capital para reprocessamento. 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).

Nesse sentido, acredita-se que as tecnologias da Indústria 4.0 sejam capazes de auxiliar na orquestração de um ecossistema circular. Segundo Nana *et al.* (2025), essas tecnologias possuem um potencial transformador por serem capazes de remodelar os papéis das partes interessadas e fomentar a colaboração entre os múltiplos atores, através da utilização de ferramentas como Inteligência Artificial, *Internet of Things* e *Blockchain*. Para Komninos *et al.* (2021), as tecnologias digitais funcionam como impulsionadores dentro de um ecossistema, atuando na conexão entre atores, operações, infraestruturas e ambientes. Além disso, a digitalização permite a reestruturação da cadeia de valor ao remodelar a distribuição de valor agregado entre os atores em áreas como pesquisa e desenvolvimento, *design*, produção e manufatura, o que facilita a sinergia na cadeia industrial (Liu *et al.*, 2025).

Ao considerar a problemática apresentada, surgiu a seguinte pergunta de pesquisa: “na cadeia fotovoltaica, como as aplicações tecnológicas 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 construir 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*". Para encontrar o máximo de artigos possível, não foram utilizados filtros nesta revisão. Assim, com a aplicação da *string* de busca nas bases, foram encontrados 212 artigos na Scopus e 486 na Web of Science.

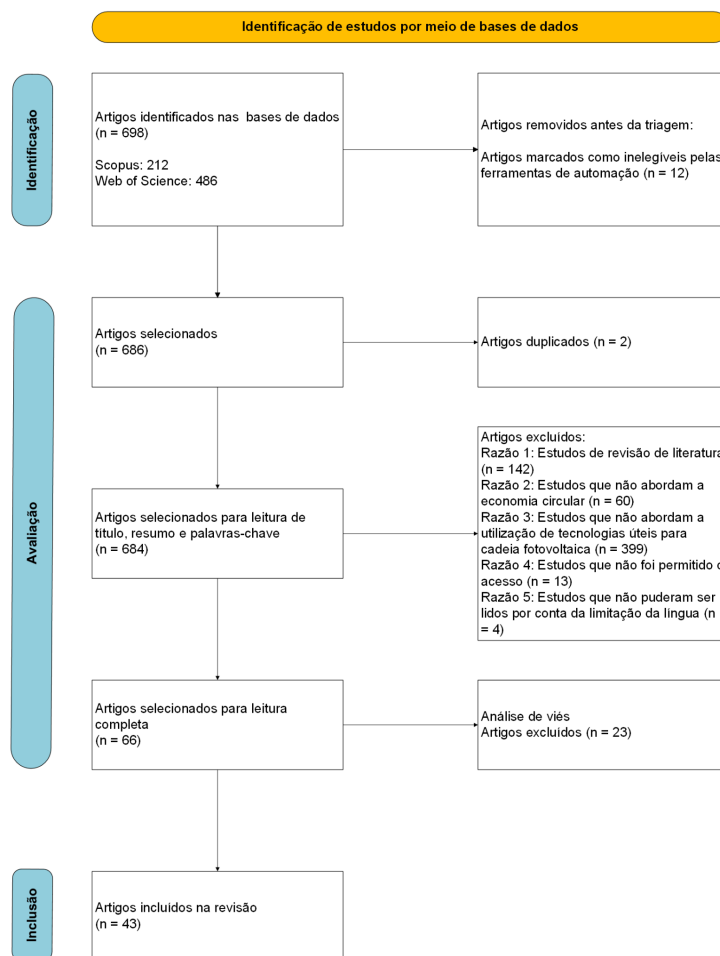
O *software* Parsifal foi utilizado para realizar a avaliação, leitura e organização dos estudos encontrados. Dessa forma, dos 698 artigos, 12 foram removidos por conta da impossibilidade de acesso à base de dados Scopus. Desse total, 686 artigos passaram pela primeira etapa de revisão, onde foram lidos o título, o resumo e as palavras-chave. Nesta etapa, dois artigos estavam duplicados. No Quadro 1 é possível visualizar os critérios de inclusão e exclusão aplicados nos 684 estudos.

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão da pesquisa

<b>Critério de inclusão</b>	<b>Quantidade</b>
Estudos que abordam a utilização de tecnologias no contexto fotovoltaico	6
Estudos que abordam a utilização de tecnologias para auxiliar em um ecossistema circular	60
<b>Critério de exclusão</b>	<b>Quantidade</b>
Estudos de revisão de literatura	142
Estudos que não abordam a economia circular	60
Estudos que não abordam a utilização de tecnologias úteis para a comunicação na cadeia fotovoltaica	399
Estudos em que não foi permitido o acesso	13
Estudos que não puderam ser lidos por conta da limitação da língua	4

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

Nesta seção será apresentada a análise dos resultados após a leitura completa dos 43 artigos selecionados. Primeiramente, será realizada uma análise descritiva dos estudos escolhidos, apresentando informações sobre periódicos e conferências, países e ano de publicação. Na subseção seguinte será realizada a análise de conteúdo, com o estudo sobre o uso das tecnologias para auxiliar no ecossistema circular.

#### 3.1 ANÁLISE DESCRITIVA

Os artigos analisados são provenientes de uma quantidade considerável de periódicos e conferências, como é possível analisar nas Figuras 2 e 3. Ao todo, 28 periódicos apareceram na amostra, onde o “Journal of Cleaner Production” lidera com quatro artigos, seguido de “Business Strategy and the Environment”, “Computers & Industrial Engineering”, “IFAC-PapersOnLine”, “Sustainability”, “Technological Forecasting and Social Change” e “Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review”, todos com dois artigos. Em relação a conferências, houve a participação de seis, todas com apenas um artigo.

Figura 2 - Distribuição de artigos entre periódicos

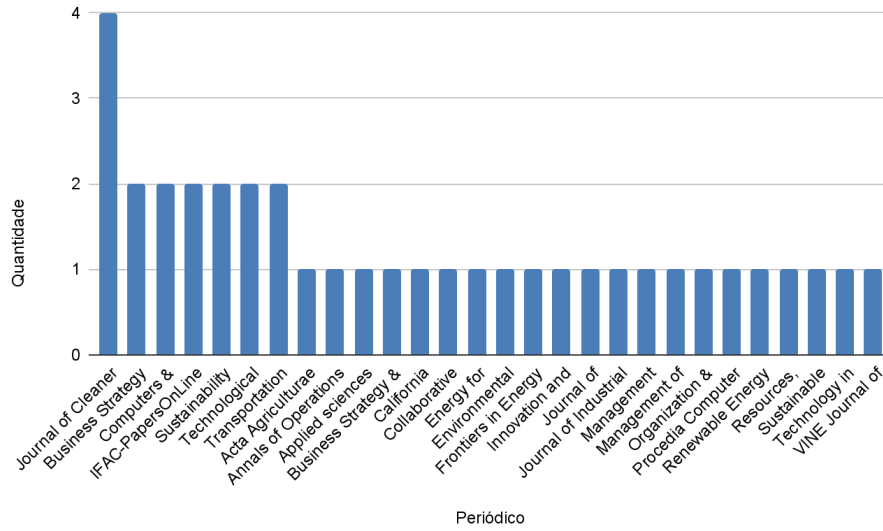
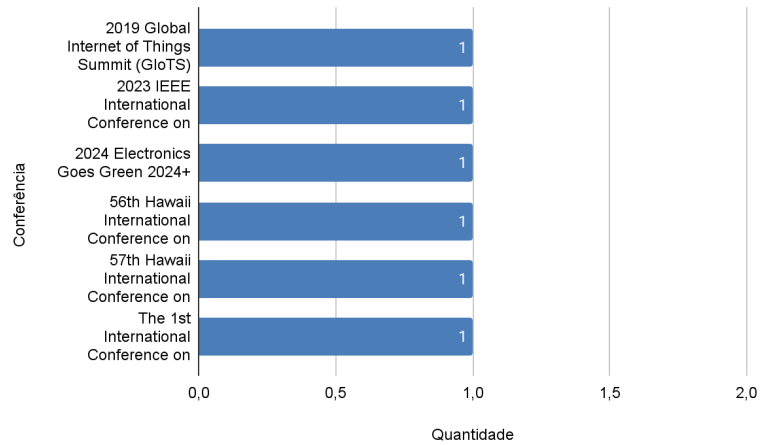
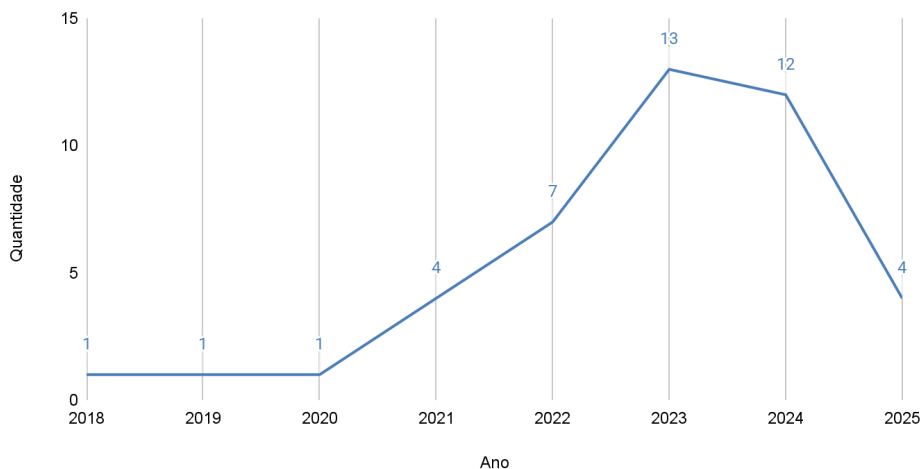


Figura 3 - Distribuição de artigos entre conferências



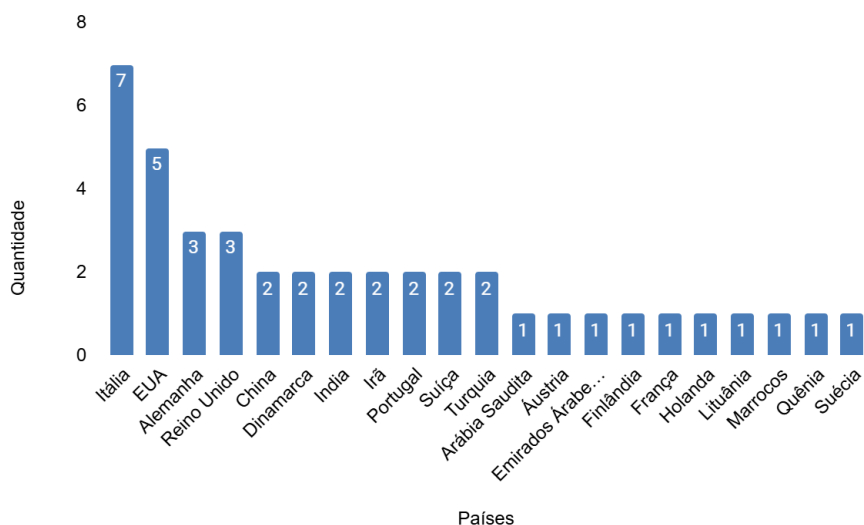
Quanto à data de publicação, observa-se na Figura 4 que todos os estudos selecionados foram publicados a partir de 2018. A partir desse período, verificou-se um aumento expressivo na produção científica sobre o uso de tecnologias digitais, com destaque para 2023, ano que concentra o maior número de publicações da amostra. Nota-se também que, até o momento da realização desta RSL, o ano de 2025 já apresenta a mesma quantidade de pesquisas publicadas que em 2021, reforçando a atual relevância do tema.

Figura 4 - Distribuição de artigos ao longo do ano de publicação



Por fim, na Figura 5, foi possível analisar a quantidade de artigos por países. A Itália apresentou o maior número de publicações (7), seguida pelos EUA (5), Alemanha (3) e Reino Unido (3).

Figura 5 - Distribuição de artigos por países



Portanto, a análise descritiva dos artigos mostra que a pesquisa sobre o uso de tecnologias digitais no contexto da comunicação e da integração de cadeias de valor e ecossistemas circulares tem sido crescente e presente nos mais diversos setores. Além disso, é possível perceber uma quantidade considerável de pesquisas em países desenvolvidos, enquanto, por exemplo, não há a presença de pesquisas da América Latina na amostra em estudo, o que evidencia necessidade de estudos na região a fim de entender a aplicação das tecnologias nos mais diversos territórios.

### 3.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO

Foram encontradas aplicações de diversas tecnologias digitais para a integração dos atores dentro de uma cadeia de valor. Essas tecnologias são: *Big Data*, *Blockchain*, *Cloud Computing*, *Digital Product Passport (DPP)*, Inteligência Artificial (IA), *Internet of Things*

(IoT) e Tokens. No Quadro 2 podem ser visualizadas as tecnologias estudadas e os autores responsáveis pelas pesquisas.

Quadro 2 - Tecnologias para a integração dos atores dentro de uma cadeia de valor

<b>Tecnologia utilizada</b>	<b>Autores</b>
<i>Big Data</i>	(Rani <i>et al.</i> , 2024; Bhandigani; Pattan; Carpitella, 2024; Modgil <i>et al.</i> , 2021; Govindan; Gholizadeh, 2021; Cao, 2022)
<i>Blockchain</i>	(Pan <i>et al.</i> , 2023; Erol <i>et al.</i> , 2021; Ferreira <i>et al.</i> , 2023; Ribeiro da Silva <i>et al.</i> , 2023; Khadke <i>et al.</i> , 2021; Erol <i>et al.</i> , 2022; Movaffaghi; Yitmen, 2023; Hasan <i>et al.</i> , 2023; Mazumdar, 2023; Ghobakhloo <i>et al.</i> , 2023)
<i>Cloud Computing</i>	(Pan <i>et al.</i> , 2023; Berndt; Cobârzan; Eggeling, 2024; Mancusi; Fruggiero; Panagou, 2022)
<i>Digital Product Passport (DPP)</i>	(Boukhatmi; Nyffenegger; Grosser, 2023; Jensen <i>et al.</i> , 2024; Ellsworth-Krebs <i>et al.</i> , 2022; Gieß; Möller, 2025)
Inteligência Artificial (IA)	(Wilson; Paschen; Pitt, 2022; Mehdipour, 2024; Berndt; Cobârzan; Eggeling, 2024; Hasan <i>et al.</i> , 2023)
<i>Internet of Things (IoT)</i>	(Tajik <i>et al.</i> , 2025; Beliatis <i>et al.</i> , 2019; Mazumdar, 2023; Cao, 2022; Lardo <i>et al.</i> , 2020)
<i>Tokens</i>	(Wassenaer <i>et al.</i> , 2023; Hasan <i>et al.</i> , 2023)

Em relação a tecnologia do *Big Data*, Rani *et al.* (2024) desenvolveram uma nova estrutura de tomada de decisão para identificar os facilitadores da Indústria 4.0 como formas de alcançar a transformação digital na cadeia fotovoltaica. Bhandigani, Pattan, Carpitella (2024) investigaram o impacto nas operações logísticas da indústria, enquanto Modgil *et al.* (2021) apresentaram um cenário para uma economia circular baseada em *Big Data*, que envolve *stakeholders* como importantes tomadores de decisão. Govindan e Gholizadeh (2021) consideraram como lidar com diferentes decisões de todas as áreas da logística reversa sustentável multinível de veículos em fim de vida em um ambiente de incerteza que envolve tomada de decisão de longo prazo. Nesse sentido, percebe-se a relevância do *Big Data* como uma tecnologia para uma integração mais eficiente entre os atores de uma economia circular.

Também foi encontrada uma quantidade expressiva de pesquisas que utilizaram a tecnologia do *Blockchain*. Erol *et al.* (2021) identificaram e examinaram os fatores críticos de sucesso para aprimorar o desempenho de um ecossistema de energia solar fotovoltaica baseado em *Blockchain* rumo à economia circular na Turquia. Ferreira *et al.* (2023) investigaram se a tecnologia *Blockchain* pode ser um facilitador de redes simbióticas aditivas. E Ribeiro da Silva *et al.* (2023) investigaram se essa tecnologia oferece os recursos necessários para remover as barreiras existentes que atualmente impedem um nível mais alto de circularidade na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos. Nota-se com essas pesquisas que a utilização do *Blockchain* emprega a utilização de dados coletados para auxiliar no alcance da economia circular nas empresas.

Outras pesquisas analisam o aproveitamento de resíduos plásticos por meio da introdução da tecnologia *Blockchain* na reciclagem desses resíduos (Khadke *et al.*, 2021). Erol *et al.* (2022) investigaram o potencial do *Blockchain* para abordar as barreiras à adoção da economia circular. Movaffaghi e Yitmen (2023) criaram um *framework* de um ecossistema de plataforma digital para implementar uma economia circular dinâmica no setor da construção civil por meio da integração da tecnologia *Blockchain* e uma abordagem de

tomada de decisão multicritério. Por fim, Ghobakhloo *et al.* (2023) modelaram a micro interação das funções de sustentabilidade do *Blockchain* e identificaram possíveis sinergias e dependências entre elas.

Uma tecnologia emergente na literatura é o *Digital Product Passport* (DPP), ou passaporte de produto digital. Boukhatmi, Nyffenegger e Grosser (2023) desenvolveram um protótipo de plataforma digital para ativos fotovoltaicos a fim de facilitar práticas circulares no setor solar com base na troca de dados coletados entre os atores da cadeia de valor fotovoltaica. Jensen *et al.* (2024) identificaram práticas nos mecanismos de orquestração, sob a ótica da orquestração de ecossistemas, para verificar a adaptação de DPPs em ecossistemas industriais. Ellsworth-Krebs *et al.* (2022) exploraram o potencial que os DPPs oferecem para reinventar embalagens como um ativo que garante que os produtos possam ser armazenados e transportados com segurança em uma economia circular mais cooperativa. Enquanto Gieß e Möller (2025) modelaram o ecossistema de valor dos passaportes de produtos digitais como objetos de fronteira, identificando e analisando os atores relevantes, suas necessidades e as conexões entre eles. Portanto, percebe-se que o registro digital que os DPPs disponibilizam aos produtos permite vantagens circulares como a chegada à etapa de reciclagem.

Estudos relacionados a Internet das Coisas (*Internet of Things*) propõem uma Cadeia de Suprimentos de Circuito Fechado para baterias de íons de lítio, além de propor um sistema baseado em IoT que utiliza imagens de raios-X para aprimorar as atividades de coleta e separação em centros de reciclagem (Tajik *et al.*, 2025). Beliaty *et al.* (2019) validaram o conceito de reutilização de embalagens de alimentos na Suécia como um primeiro passo para estabelecer um caso de negócios sólido para o conceito de embalagem inteligente de IoT. Lardo *et al.* (2020) exploraram a potencial contribuição dos provedores de capacidades para um ambiente de Indústria 4.0 sustentável como uma perspectiva adicional para as decisões de gestão de uma transformação de modelo de negócios inteligentes e sustentáveis de grandes corporações. Com esses trabalhos, é possível perceber que a possibilidade de rastreamento em tempo real garante a aplicação das práticas circulares na cadeia de valor.

Outras tecnologias com menores participações são relacionadas a Inteligência Artificial. Por exemplo, Wilson, Paschen e Pitt (2022) exploraram as implicações da integração da IA na economia circular, especificamente, o papel dessa tecnologia na logística reversa. Já Mehdipour (2024) investigou a utilização de IA e técnicas de aprendizado de máquina na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O *Cloud Computing* também é abordado, na pesquisa de Mancusi, Fruggiero e Panagou (2022) que propõe um *framework* para a gestão da incerteza em processos e camadas de recuperação de produtos, através da identificação, localização, monitoramento e rastreamento inteligentes de peças e produtos em blocos de consumo, recebimento, recuperação e liberação. Por fim, os *Tokens* são discutidos na pesquisa de Wassenaer *et al.* (2023) que analisa quais tipos de *Tokens* são relevantes para a economia circular em sistemas agroalimentares e como a “tokenização” pode ajudar a melhorar a circularidade nesses sistemas.

Grande parte dos estudos utiliza uma abordagem combinada de duas ou mais tecnologias. Cao (2022) emprega a tecnologia de *Big Data* com a IoT para analisar o mecanismo de desenvolvimento colaborativo de um ecossistema de logística agrícola. Já Pan *et al.* (2023) integram o *Cloud Computing* com sistemas logísticos fotovoltaicos baseados em *Blockchain* para aumentar a eficiência, o rastreamento em tempo real e a capacidade de tomada de decisões. Esses estudos demonstraram a aplicabilidade da integração entre duas tecnologias digitais para auxiliar na logística de produtos que necessitam de um maior monitoramento.

Outras pesquisas estão relacionadas à realização de um estudo de viabilidade com tecnologia *Blockchain* habilitada por IA, utilizando uma plataforma NFT (*Token*) para gerenciamento da economia (Hasan *et al.*, 2023). Mazumdar (2023) propõe uma estrutura

unificada genérica baseada em *Blockchain* e IoT para reduzir silos de informações, ao mesmo tempo em que facilita a reciclabilidade no domínio da cadeia de valor. Já Berndt, Cobârzan e Eggeling (2024) propõem uma arquitetura de plataforma projetada para facilitar a troca e a transferência de conhecimento entre provedores de tecnologia e a indústria de manufatura através da integração de *Cloud Computing* e IA. Portanto, observa-se que abordagens combinadas colaboram para uma maior aplicação da economia circular através de um maior rastreamento e da disponibilidade da informação na cadeia de valor.

### 3.2.1 Vantagens das tecnologias utilizadas na cadeia de valor

As tecnologias apresentadas podem oferecer uma série de vantagens em uma cadeia de valor. Para Lardo *et al.* (2020), a Indústria 4.0 consiste na aplicação de tecnologias complementares, capazes de conectar pessoas, máquinas e objetos ao modelo de negócios das empresas, com o objetivo de melhor gerenciar e controlar o processo de criação de valor na cadeia. Dessa forma, a colaboração entre partes interessadas e a tecnologia são essenciais para facilitar a mudança do modelo linear para o circular através do *design* para circularidade; da rastreabilidade e transparência; e da reciclagem (Civera; Santoro; Chiaudano, 2025). As plataformas digitais, em geral, facilitam a coordenação dos intervenientes e as suas interações econômicas (Blackburn; Ritala; Keränen, 2023), além de possibilitarem maior criação e captura de valor, através da união de diversas partes interessadas, o que gera a expansão do mercado de produtos circulares (Kolade *et al.*, 2024).

Tecnologias emergentes oferecem um alto nível de interoperabilidade de dados, mesmo no nível de processos triviais, o que pode ajudar a reduzir deficiências resultantes de fontes de dados mistas e capacidades da cadeia de valor, além de reestruturar as operações nos processos (Srhir; Jaegler; Montoya-Torres, 2023). O uso estratégico de dados acelera o processo de tomada de decisão e a gestão de recursos dentro da cadeia de valor, onde a colaboração com outras partes interessadas pode aumentar a confiança e a competitividade (Piepoli *et al.*, 2024). Além disso, as tecnologias podem ser utilizadas para análise do fluxo de valor, desde a aquisição de dados, planejamento, comparação com realidades anteriores até a simulação de possíveis estados futuros (Berndt; Cobârzan; Eggeling, 2024).

Especificamente, o uso da IoT pode tornar uma cadeia de valor mais eficiente e responsiva, além de reduzir os custos de rede (Tajik *et al.*, 2025). O *Big Data* atua como uma capacidade que impacta componentes críticos da circularidade por meio de configurações dinâmicas, como importância comercial e proposta de valor (Modgil *et al.*, 2024). A IA pode ajudar a resolver problemas complexos de localização e roteirização na logística reversa e tem atraído atenção significativa por sua capacidade de revolucionar a disponibilidade de dados em diversos setores (Wilson; Paschen; Pitt, 2022; Mehdipour, 2024).

Com a cadeia de valor digitalizada, um registro de *Tokens* de circularidade pode ser desenvolvido para cada produto ou semiproduto em seu ciclo de vida, a fim de rastrear sua situação de circularidade (Wassenaer *et al.*, 2023). Os *Digital Product Passport* aumentam a transparência, a conformidade regulatória e as práticas sustentáveis, através do fornecimento de dados detalhados sobre o ciclo de vida do produto (Gieß; Möller, 2025).

Cadeias de suprimentos de nuvem se caracterizam pela dinâmica multiestrutural; plataformas, cadeias de suprimentos digitais, ecossistemas e visibilidade, composição dinâmica de serviços com funções de comprador/fornecedor que mudam dinamicamente, resiliência e viabilidade, e redes de suprimentos interligadas e economia circular (Ivanov; Dolgui; Sokolov, 2022), portanto, o *Cloud Computing* pode ser utilizado para a identificação, localização, monitoramento e rastreamento inteligentes de peças e produtos em blocos de consumo, recebimento, recuperação e liberação (Mancusi; Fruggiero; Panagou, 2022).

Uma das funções sustentáveis do *Blockchain* é o monitoramento da cadeia de valor, além das capacidades de rastreabilidade e transparência que levam os parceiros de

fornecimento a aderir às suas responsabilidades de circularidade e implantarem práticas como a reciclagem (Ghobakhloo *et al.*, 2023). Além do mais, essa tecnologia acrescenta benefícios como transparência, automação e validação aos aplicativos da cadeia de valor e também pode proteger os direitos de propriedade intelectual do fabricante do produto, através da proteção das informações do produto (Mazumdar, 2023).

### 3.2.2 Vantagens percebidas na indústria fotovoltaica

A tomada de decisão baseada em dados promove uma sintonia na comunicação e enriquece a colaboração entre as partes interessadas, o que prepara 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 práticas 10R da economia circular na cadeia de valor de energia solar fotovoltaica (Ariöz; Yılmaz; Yıldızbaşı, 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 sustentável fotovoltaica, seguida por tecnologias de nuvem, serviços móveis e Inteligência Artificial (Mastrocinque *et al.*, 2022). O *Big Data* pode ser a tecnologia mais adequada para a cadeia fotovoltaica por conta do Custo de Capital e Custos de Operação e Manutenção (Rani *et al.*, 2024).

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).

### 3.2.3 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 têm sido abordado em contextos diversos, como na inovação e no empreendedorismo, que podem abranger o contexto circular.

Nesse sentido, 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 valor são barreiras significativas para a adoção da economia circular. As tecnologias são essenciais para facilitar atividades de colaboração seguras e eficientes, além dos 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).

Em um 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.

As tecnologias estão fortemente envolvidas na ativação e no apoio em um ecossistema empreendedor por facilitarem funções-chave como compartilhamento de informações ou comunicação, apoiam os participantes no desenvolvimento de competências e estão no cerne de muitos novos empreendimentos (Wilson; Paschen; Pitt, 2022), além de criarem valor e benefícios compartilhados para os participantes do ecossistema por meio de efeitos de rede (Rajala *et al.*, 2018).

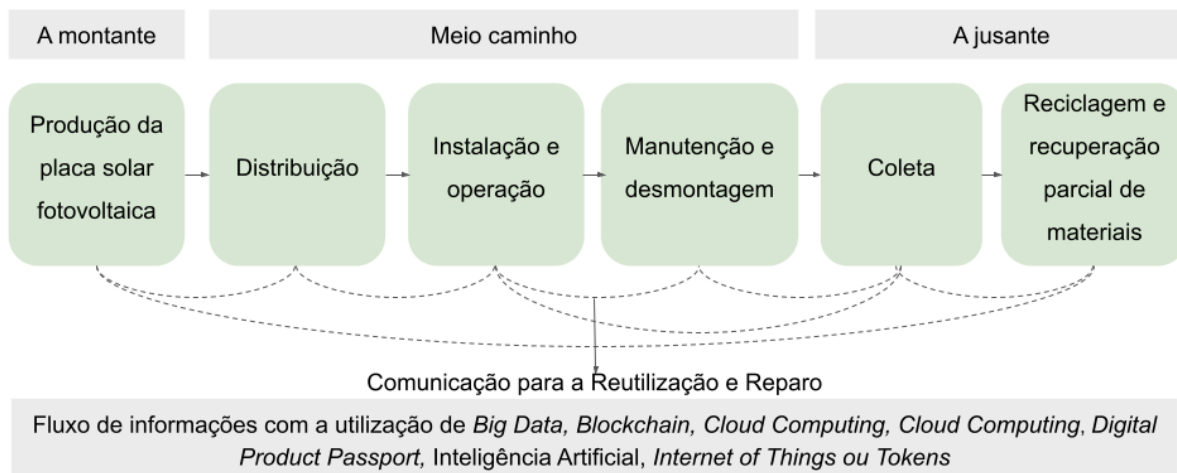
Um orquestrador, como entidade organizacional responsável pelo ecossistema, deve apresentar a tecnologia aos atores, além de definir os objetivos da plataforma, projetar modelos de negócios e o ecossistema inicial (Marantes; Soares; Silva, 2023; Blackburn; Ritala; Keränen, 2023). O desenvolvimento de 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 economia circular (Mazumdar, 2023). Além disso, os DPPs também podem ser considerados produtos que geram valor sustentado por meio de ecossistemas colaborativos e bem coordenados (Jensen *et al.*, 2024).

### **3.2.4 A troca de informações na cadeia de valor fotovoltaica**

Após a análise do conteúdo apresentado anteriormente, foi proposto um *framework* (Figura 6) 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 sentido direto.

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 os módulos solares para pontos de coleta, que irão distribuí-los e, posteriormente, reciclá-los. Da mesma forma, módulos que precisam de manutenção podem retornar ao instalador para reparos ou substituição.

Figura 6 - Troca de informações na cadeia de valor fotovoltaica



Portanto, percebe-se a importância da troca de informações na cadeia fotovoltaica, principalmente a fim de orquestrar um ecossistema circular, visto que o fornecimento de informações confiáveis sobre as características, a qualidade e os componentes dos produtos e facilitar 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, além do 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.
- ARYEE, Raphael *et al.* Circular ecosystems: Past, present, and future research directions. *Journal of Industrial Ecology*, 1 ago. 2025.

BELIATIS, Michail J. *et al.* **Internet of Things for a sustainable food packaging ecosystem insights from a business perspective.** [*S.l.: S.n.*].

BERNDT, René; COBĂRZAN, Doriana; EGGELING, Eva. **A Platform Architecture for Data-and AI-supported human-centred Zero Defect Manufacturing for Sustainable Production.** *In: Elsevier B.V.*, 1 ago. 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.

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.

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, 15 set. 2023.

CAO, Jingyu. Coordinated development mechanism and path of agricultural logistics ecosystem based on big data analysis and IoT assistance. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, v. 72, n. 1, p. 214–224, 2022.

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.

ELLSWORTH-KREBS, Katherine *et al.* Circular economy infrastructure: Why we need track and trace for reusable packaging. **Sustainable Production and Consumption**, v. 29, p. 249–258, 1 jan. 2022.

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.

FERREIRA, Inês A. *et al.* Boosting additive circular economy ecosystems using blockchain: An exploratory case study. **Computers and Industrial Engineering**, v. 175, 1 jan. 2023.

GARLET, Taís 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.

GARLET, Taís Bisognin; SAVIAN, Fernando de Souza; RIBEIRO, José Luis Duarte. Unveiling synergies: an analysis of inter-organizational relationships in the Brazilian photovoltaic distributed generation value chain. **Sustainable Futures**, v. 9, 1 jun. 2025.

GHOBAKHLOO, Morteza *et al.* Blockchain technology as an enabler for sustainable business ecosystems: A comprehensive roadmap for socioenvironmental and economic sustainability. **Business Strategy and Development**, v. 7, n. 1, 1 mar. 2024.

GIESS, Anna; MÖLLER, Frederik. Exploring the value ecosystem of digital product passports. **Journal of Industrial Ecology**, v. 29, n. 2, p. 561–573, 1 abr. 2025.

GOVINDAN, Kannan; GHOLIZADEH, Hadi. Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 149, 1 maio 2021.

HASAN, Md Mahmudul *et al.* Circology: An AI-Enabled Blockchain-Based e-Waste Management Framework Using Non-Fungible Tokens (NFT) to Achieve Net Zero and

**Imply the Circular Economy.** *In:* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

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

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Energy Review 2025**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

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.

KHADKE, Swikriti *et al.* Efficient plastic recycling and remolding circular economy using the technology of trust–blockchain. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 16, 2 ago. 2021.

KOMNINOS, Nicos *et al.* Digital Transformation of City Ecosystems: Platforms Shaping Engagement and Externalities across Vertical Markets. **Journal of Urban Technology**, v. 28, n. 1–2, p. 93–114, 2021.

LADENBURG, Jacob *et al.* Taking the carbon capture and storage, wind power, PV or other renewable technology path to fight climate change? Exploring the acceptance of climate change mitigation technologies – A Danish national representative study. **Renewable Energy**, v. 220, 1 jan. 2024.

LARDO, Alessandra *et al.* The perspective of capability providers in creating a sustainable I4.0 environment. **Management Decision**, v. 58, n. 8, p. 1759–1777, 4 dez. 2020.

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.

LIU, Zegang *et al.* Digital technology innovation, value chain reshaping and digital transformation. **Finance Research Letters**, v. 85, 1 nov. 2025.

MANCUSI, F.; FRUGGIERO, F.; PANAGOU, S. **A cloud-aided remanufacturing framework to assess the relative complexity.** *In:* Elsevier B.V., 2022.

MAZUMDAR, Somnath. **How to Reduce Information Silos While Blockchain-ifying Recycling Focused Supply Chain Solutions?** [*S.l.*: *S.n.*]. 2023.

MEHDIPOUR, Zahra. **The Application of AI for electronic LCA data and assessment toward the circular economy.** [*S.l.*]: IEEE, 2024.

MENTIMIN, Merhaba; WANG, Nan; MOGI, Gento. Solar photovoltaics adoption and its impacts on energy consumption: evidence from Japanese households. **Renewable Energy Focus**, v. 53, 1 jun. 2025.

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

MODGIL, Sachin *et al.* Big data-enabled large-scale group decision making for circular economy: An emerging market context. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 166, 1 maio 2021.

MOVAFAGHI, Hamid; YITMEN, Ibrahim. Framework for Dynamic Circular Economy in the Building Industry: Integration of Blockchain Technology and Multi-Criteria Decision-Making Approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 22, 1 nov. 2023.

NANA, André *et al.* Towards a circular business ecosystem 4.0 in the cosmetics industry: Findings from a bibliometric analysis and systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, , 25 ago. 2025.

NYFFENEGGER, Roger *et al.* How circular is the European photovoltaic industry? Practical insights on current circular economy barriers, enablers, and goals. **Journal of Cleaner Production**, v. 448, 5 abr. 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.

PIERONI, Marina P. P.; MCALOONE, Tim C.; PIGOSSO, Daniela C. A. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, , 1 abr. 2019.

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.

PIETRULLA, Felicitas. Circular ecosystems: A review. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, Elsevier B.V., , 1 dez. 2022.

RABAIA, Malek Kamal Hussien *et al.* Enabling the circular economy of solar PV through the 10Rs of sustainability: Critical review, conceptualization, barriers, and role in achieving SDGs. **Sustainable Horizons**, Elsevier B.V., , 1 set. 2024.

RADAVIČIUS, Tadas; GROESSER, Stefan N.; TVARONAVIČIENĖ, Manuela. Assessment of constraints in the European Union photovoltaics circular supply chain for enhanced circularity. **Journal of Cleaner Production**, v. 489, 15 jan. 2025.

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, 1 jun. 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.

SHAW, Stephanie L. *et al.* A circular economy roadmap for solar photovoltaics. **Solar Energy**, v. 276, 1 jul. 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.

TAJIK, Mahmoud *et al.* Digitalization-driven circular economy in battery closed-loop supply chain network design. **Journal of Cleaner Production**, v. 496, 10 mar. 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.

WASSENAER, Lan *et al.* Tokenizing circularity in agri-food systems: A conceptual framework and exploratory study. **Journal of Cleaner Production**, v. 413, 10 ago. 2023.

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.

XIA, Dawei *et al.* Exploring the Opportunities and Gaps in the Transformation of Modern Rural Housing in Southern China to Net Zero Energy Buildings. **Buildings**, v. 14, n. 9, 1 set. 2024.

ZAABI, Balaqis; GHOSH, Aritra. Managing photovoltaic Waste: Sustainable solutions and global challenges. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, , 15 nov. 2024.

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