

# Economia circular e a energia solar fotovoltaica

Mario Roberto dos Santos<sup>1</sup>

José Luiz Romero de Brito<sup>2</sup>

Fabio Ytoshi Shibao<sup>3</sup>

Submissão: 11/10/2021

Aceite: 10/12/2021

## Resumo

Esforços consideráveis estão sendo realizados na introdução gradual de fontes de energias sustentáveis para satisfazer as necessidades futuras de energia. A energia desempenha um papel essencial na economia circular porque as atividades circulares, como o processamento de materiais, requerem energia e calor. O objetivo foi pesquisar na literatura se a geração e o uso de energia solar fotovoltaica poderão contribuir para com os preceitos de economia circular. Foram realizadas pesquisas na base de dados *ScienceDirect* utilizando-se as palavras “solar and energy and circular economy”, “photovoltaic and energy and circular economy” sendo encontrados 25 artigos. Os artigos foram classificados nos temas “geração e uso de energia solar fotovoltaica”; “recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica” e “comparação com a geração de outras formas de energia”. Foram localizados quinze artigos sobre “geração e uso de energia solar fotovoltaica”, oito artigos sobre “recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica” e dois artigos sobre “comparação com a geração de outras formas de energia”. Verificou-se na pesquisa que a energia solar fotovoltaica, seja na geração de energia considerada uma fonte limpa e renovável, uso ou por meio de seus resíduos tanto da produção dos equipamentos ou após a vida útil, é uma tecnologia que poderá contribuir com a economia circular.

**Palavras-chave:** Economia circular. Energia solar fotovoltaica. Fontes de energia.

## *Circular economy and the solar photovoltaic energy*

### Abstract

*Considerable efforts are being made to gradually introduce sustainable energy sources to meet future energy needs. Energy plays an essential role in the circular economy because circular activities, such as materials processing, require energy and heat. The objective was to research in the literature if the generation and use of photovoltaic solar energy can contribute to the circular economy precepts. Searches were carried out in the ScienceDirect database using the words “solar and energy and circular economy”, “photovoltaic and energy and circular economy” and 25 papers were found. The papers were classified under the themes “generation and use of photovoltaic solar energy”; “recovery of material from photovoltaic energy generation equipment” and “comparison with the generation of other forms of energy”. Fifteen articles were found on “generation and use of photovoltaic solar energy”, eight articles on “material recovery from photovoltaic energy generation equipment” and two articles on “comparison with the generation of other forms of energy”. It was found in the research that photovoltaic solar energy, whether in the generation of energy considered a clean and renewable source, use or through its waste either from the production of equipment or after its useful life, is a technology that can contribute to the circular economy.*

**Keywords:** Circular economy. Photovoltaic solar energy. Energy sources.

## 1 Introdução

Esforços consideráveis estão sendo realizados na introdução gradual de fontes de energias renováveis e sustentáveis para satisfazer as necessidades futuras de energia (BIST; SIRCAR; YADAV, 2020). Mover-se em direção a uma economia global de zero carbono por meio

---

<sup>1</sup> Doutorado em Administração (UNINOVE). Professor da Universidade Nove de Julho (UNINOVE).

<https://orcid.org/0000-0001-6222-9255> Email: [mario.rsantos@terra.com.br](mailto:mario.rsantos@terra.com.br)

<sup>2</sup> Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE/IEE/USP) da Universidade de São Paulo (USP).

<https://orcid.org/0000-0002-2357-5363> Email: [romerobrito.usp@gmail.com](mailto:romerobrito.usp@gmail.com)

<sup>3</sup> Doutorado em Administração de Empresas (Universidade Presbiteriana Mackenzie). Professor do Programa de

Pós-Graduação em Administração da Universidade Ibirapuera (UNIB). <https://orcid.org/0000-0002-6666-0330>

Email: [fabio.shibao@gmail.com](mailto:fabio.shibao@gmail.com)

de reduções absolutas no uso de combustíveis fósseis é uma maneira segura de mitigar as mudanças climáticas, e uma série de benefícios ambientais, sociais e econômicos se seguiriam como consequência (HART; POMPONI, 2021).

A tecnologia fotovoltaica é uma dessas tecnologias de energia renovável, cujo uso deve crescer significativamente nos próximos anos (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020) pois é uma alternativa promissora quando comparada com as demais tecnologias (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021). Além disso, conforme a demanda pela tecnologia aumenta, também aumentará a necessidade de minerar materiais virgens (por exemplo silício, índio, prata, telúrio, cobre) para a fabricação de novos produtos e equipamentos, mas esses materiais virgens são finitos (CURTIS et al., 2021).

Outra consequência do aumento exponencial global em instalações fotovoltaicas são os níveis resultantes de resíduos fotovoltaicos (FARREL et al., 2020; GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021). Esses resíduos incluem várias substâncias valiosas que, se devidamente recicladas, poderão trazer benefícios econômicos significativos. A recuperação dessas matérias-primas pode criar a possibilidade de uma economia circular (EC) com uma abordagem planejada para prevenir os impactos ambientais potenciais e maximizar a eficiência dos recursos (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020).

A energia desempenha um papel essencial na EC porque as atividades circulares, como o processamento de materiais, requerem energia e calor (KIVIRANTA et al., 2020). Entre essas fontes de energia, o sistema de energia solar fotovoltaica representa a geração de oportunidades nas cadeias produtivas e visa garantir que o desenvolvimento de produtos se ajuste aos ciclos naturais, buscando a minimização das externalidades negativas dos processos produtivos (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2018).

Nesse contexto de energia solar fotovoltaica como fonte geradora de resíduos (FARREL et al., 2020; GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021) e a EC como uma solução para os desafios ecológicos e socioeconômicos resultantes do aumento do consumo de recursos não renováveis, geração de resíduos, poluição e escassez de recursos (GOYAL; CHAUHAN; MISHRA, 2021), o objetivo foi pesquisar na literatura se a geração e o uso de energia solar fotovoltaica poderão contribuir com os preceitos da economia circular.

O artigo está assim organizado, após esta introdução, a seção dois apresenta a revisão da literatura, a seção três o método de pesquisa empregado, a seção quatro os resultados da pesquisa e a seção cinco as considerações finais.

## 2 Revisão da literatura

Esta revisão abordará os temas energia solar fotovoltaica e economia circular.

### 2.1 Energia solar

A energia solar fotovoltaica é uma das principais fontes de energia para a substituição de fontes de geração de energia não renováveis (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020) à medida que satisfaz as metas de energia limpa e política climática e tornando-se assim uma tecnologia mais competitiva (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021).

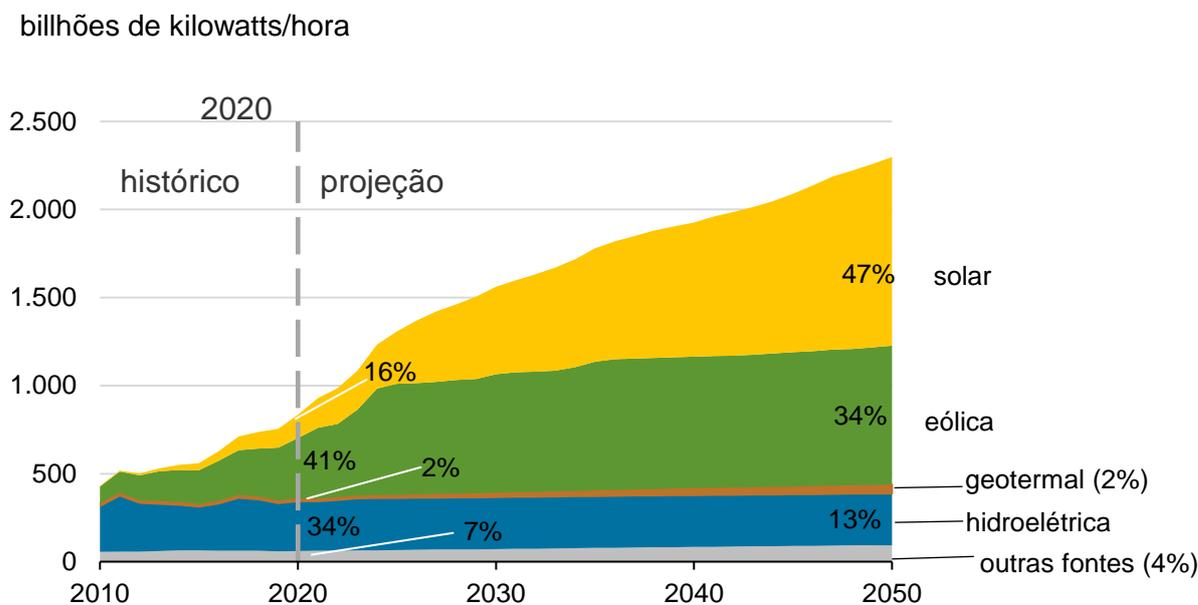
Os sistemas solares fotovoltaicos são uma forma de tecnologia de energia de baixo custo e são reconhecidos como uma fonte de energia confiável, eficiente e ecologicamente correta. Apesar da operação típica de baixo impacto, isso não significa necessariamente que a energia solar seja completamente livre de impactos ambientais e de saúde humana ao longo de seu ciclo de vida. Assim que os painéis fotovoltaicos, inversores e sistema de armazenamento de energia da bateria atingirem o fim de seus ciclos de vida individuais, eles formarão uma grande quantidade de lixo eletrônico (SALIM et al., 2019). Segundo Alves et al. (2021) a geração de resíduos compromete a qualidade de vida da sociedade e também agrava os impactos ambientais.

Os painéis fotovoltaicos e os sistemas de armazenamento de energia contêm materiais perigosos como chumbo, lítio, estanho e cádmio (CUCCHIELLA et al., 2015) que podem prejudicar o meio ambiente e a saúde humana se não forem gerenciados adequadamente no final do ciclo de vida. Esses equipamentos também contêm materiais valiosos como rutênio, gálio, índio e telúrio que são escassos e será conveniente recuperar. A gestão adequada do fim da vida (ou seja, acondicionamento, reutilização ou reciclagem) dessa tecnologia é necessária, não apenas para mitigar os problemas ambientais, mas também para evitar a escassez de materiais críticos para atender às futuras demandas de recursos. O planejamento estratégico de fim da vida apropriado irá impulsionar a EC e permitir uma recuperação de material mais eficaz (SALIM et al., 2019). Segundo o *U.S. Energy Information Administration* (EIA, 2021), a energia solar deverá crescer a sua participação na produção mundial de energia renovável dos 16% em 2020 para 47% em 2050, tornando-se a maior fonte mundial de energia renovável (Figura 1).

No cenário nacional, a matriz elétrica brasileira é fortemente influenciada por fontes renováveis, com a hidroeletricidade. No entanto, devido às disponibilidades limitadas de recursos hídricos, aumento da demanda de eletricidade e de água e pressão sobre o meio

ambiente, existem esforços no sentido de diversificar essa matriz para incluir outras fontes renováveis e com isso tem-se observado uma participação crescente da energia solar (MEDEIROS et al., 2021), principalmente devido ao alto nível de irradiação solar, reduções nos custos dos sistemas fotovoltaicos e incentivos governamentais (RIGO et al., 2022).

Figura 1 – Projeção da produção de energias renováveis



Fonte: EIA (2021, p.16)

No cenário nacional, a matriz elétrica brasileira é fortemente influenciada por fontes renováveis, com a hidroeletricidade. No entanto, devido às disponibilidades limitadas de recursos hídricos, aumento da demanda de eletricidade e de água e pressão sobre o meio ambiente, existem esforços no sentido de diversificar essa matriz para incluir outras fontes renováveis e com isso tem-se observado uma participação crescente da energia solar (MEDEIROS et al., 2021), principalmente devido ao alto nível de irradiação solar, reduções nos custos dos sistemas fotovoltaicos e incentivos governamentais (RIGO et al., 2022).

A previsão de participação da energia solar na matriz elétrica brasileira para o ano de 2050, considerando apenas a geração centralizada, é de 5% a 16% em termos de capacidade instalada ou de 4% a 12% em termos de geração de energia, conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020). Atualmente, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA, 2021), em 25/09/2021, a geração fotovoltaica representava 2,14% da potência fiscalizada, na matriz elétrica brasileira.

O aumento global anual em instalações fotovoltaicas e os níveis resultantes de resíduos fotovoltaicos é uma preocupação crescente. Estima-se que em 2050 haverá entre 60 e 78 milhões

de toneladas de resíduos fotovoltaicos em circulação (FARRELL et al., 2020). Então, a indústria fotovoltaica é aquela para a qual uma infraestrutura de fim da vida deve ser desenvolvida a fim de evitar esse cenário de potenciais resíduos e também impedir que recursos valiosos acabem como resíduos sem valor (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020).

Portanto, há uma necessidade significativa de uma cadeia de abastecimento circular para gerenciar esses resíduos e recuperar recursos equilibrando assim a estrutura econômica (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021). Segundo Curtis et al. (2021) novas e ampliadas oportunidades de mercado, criação de empregos, estabilidade da cadeia de suprimentos e redução dos impactos ambientais negativos são motivadores para investimentos em reparo, reutilização e reciclagem de equipamentos de sistemas fotovoltaicos.

## 2.2 Economia circular

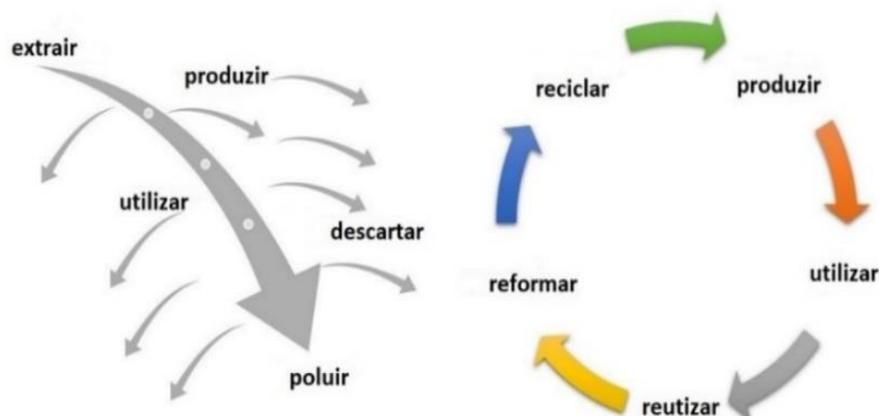
A industrialização global foi responsável por grandes quantidades de resíduos gerados, que se acumularam ao longo dos anos. O problema dos resíduos é geralmente um problema global, que afeta todos os países, sejam países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Para garantir que as gerações futuras terão recursos suficientes como alimentos, água e prosperidade, é necessário, portanto, fazer a transição de uma economia linear para uma EC (HALOG; ANIEKE, 2021).

A comunidade internacional concorda com a necessidade de manter o equilíbrio ambiental atual para garantir a equidade para as gerações futuras e permitir o bem-estar e a dignidade humana já no presente. Conseqüentemente, limitações físicas e ambientais são identificadas, que devem ser observadas para tornar a EC sustentável (DESING et al., 2020).

Em resposta à necessidade de uma mudança fundamental na forma como os bens e produtos são produzidos e consumidos e a necessidade de atender a esses desafios, o conceito de EC ganhou força recentemente. O conceito é uma alternativa ao modelo linear atual de 'produzir-utilizar-descartar' de produção e consumo (HART; POMPONI, 2021) que é corroborado pelo paradigma de que para haver desenvolvimento é necessário que haja um crescimento econômico exagerado (VIER et al., 2021). A crescente população mundial exerce uma pressão indiscutível sobre os recursos naturais e esse crescimento desenfreado torna essencial a mudança desse modelo linear habitual, para um modelo circular de 'utilizar-reutilizar-reciclar-reformar-redistribuir' (HALOG; ANIEKE, 2021), substituindo a configuração em malha aberta por

um sistema circular em malha fechada (GOYAL; CHAUHAN; MISHRA, 2021). A Figura 2 mostra de forma gráfica esse conceito.

Figura 2 – Modelo linear e modelo circular



Fonte: Adaptado de Weetman (2016)

Segundo Jabbour (2019), a EC é um modelo econômico que busca extrair o maior valor possível dos materiais e da energia utilizados nos produtos para evitar o consumo desnecessário e excessivo de matérias-primas e energia. Do ponto de vista da EC, o que geralmente é classificado como resíduo é visto como um recurso potencial que pode ser usado como matéria-prima, componente ou fonte de energia, seja dentro do mesmo processo ou em outra cadeia de abastecimento. O principal objetivo é manter a circulação de materiais, componentes e resíduos, maximizando assim o valor dos recursos. Existem duas perspectivas complementares para a implementação de práticas de EC: uma baseada na adoção de estratégias que melhorem a circularidade dos recursos e outra baseada no desenvolvimento de novos modelos de negócios (JABBOUR, 2019).

A EC promete uma economia capaz de prosperar com recursos limitados fechando os ciclos dos materiais. No entanto, não há garantia de que estratégias simples de ciclagem de materiais, irão de fato levar a uma economia capaz de administrar os recursos, a poluição e a demanda social em níveis ambientalmente sustentáveis (DESING et al., 2020).

Várias definições de EC estão disponíveis, o que implica que este conceito tem um limite indefinido, onde os atores envolvidos conduzem pontos de vista e percepções (GOYAL; CHAUHAN; MISHRA, 2021). Entre essas definições, Desing et al. (2020) propuseram como um modelo que adota uma visão baseada em recursos e sistêmica, visando levar em consideração

todas as variáveis do sistema Terra, a fim de manter sua viabilidade para o ser humano. Serve à sociedade para alcançar o bem-estar dentro dos limites físicos e das fronteiras planetárias.

A EC consegue isso por meio da tecnologia e da inovação do modelo de negócios, que fornecem os bens e serviços exigidos pela sociedade, levando à prosperidade econômica de longo prazo. Esses bens e serviços são movidos a energia renovável e dependem de materiais que são renováveis por meio de processos biológicos ou podem ser mantidos com segurança na tecnosfera, exigindo extração mínima de matéria-prima e garantindo o descarte seguro de resíduos e dispersão inevitáveis no meio ambiente. A EC baseia-se e gerencia os recursos disponíveis de forma sustentável e otimiza sua utilização por meio da minimização da produção de entropia, ciclos lentos e eficiência de recursos e energia.

Vier et al. (2021, p. 42) advertiram que:

[...] a adoção de uma Economia Circular requer a mudança de valores e princípios, com a implantação das práticas sustentáveis, em toda a cadeia de suprimentos. Portanto, a adoção deste modelo depende não só da empresa, mas também, dos fornecedores, clientes, sociedade e poder público. A Economia Circular não irá alcançar o seu objetivo, se ocorrer de forma isolada.

O foco nos modelos de negócios com base nos princípios da EC também está crescendo. A EC, ao substituir modelos industriais de operação linear por sistemas de produção em ciclo fechado cíclicos baseados no princípio de não desperdício existente na natureza, tem o potencial de resolver as graves deficiências da produção linear e sistemas de consumo (DE ANGELIS, 2020). Segundo Jabbour et al. (2020) a adoção da EC pelas empresas tende a melhorar seus indicadores de desempenho sustentável, com o efeito de melhorar a eficiência econômica e ambiental e a imagem social. A EC tornou-se um tema contemporâneo na academia, na indústria e para os formuladores de políticas (GEISSDOERFER et al., 2017).

### **3 Método de pesquisa**

Esta é uma pesquisa descritiva, com abordagens qualitativas, por meio de análise de conteúdo (BARDIN, 2009). Uma revisão eficaz institui uma base sólida para o avanço do conhecimento, facilita o desenvolvimento da teoria (WEBSTER; WATSON, 2002) e é utilizada para gerenciar a diversidade de conhecimentos para uma investigação acadêmica específica (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

Foram realizadas pesquisas na base de dados *ScienceDirect* utilizando-se as palavras “*solar and energy and circular economy*”, “*photovoltaic and energy and circular economy*” nos

campos “*title, abstract, keywords*” e limitadas por tipo “*review*” e “*research*”. Foi limitado o período de publicação até o ano de 2020. Essa base foi escolhida por ter periódicos relevantes, classificados no estrato Qualis A1 (2013-2016) como, por exemplo *Journal of Cleaner Production; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Resources, Conservation and Recycling*; entre outros, alto fator de impacto e também por facilidade de acesso. O período de realização da pesquisa foi de setembro de 2020 a janeiro de 2021.

Pela pesquisa com as palavras “*photovoltaic and energy and circular and economy*” foram encontrados 19 artigos e com as palavras “*solar and energy and circular economy*” 27 artigos, sendo que 12 artigos foram comuns às duas pesquisas. Os 34 artigos foram lidos os títulos e os *abstracts/resumos* e, posteriormente, verificados quais artigos se enquadraram no tema. Depois dessa verificação, foram selecionados 25 artigos que tratavam de EC por meio da geração ou uso de energia fotovoltaica. Foram descartados nove trabalhos, um editorial sobre os resultados de um congresso e oito artigos envolvendo dessalinização de água do mar; pirólise de biocarvão; utilização de bagaço de tomate; biorrefinaria de microalgas; desempenho térmico de uma fachada; rotação no plantio de árvores; materiais e fluxos ambientais em uma universidade australiana; e fotoanodos de hematita preparados por soluções tratadas com ácido clorídrico.

#### 4 Resultados

O quadro 1 (a seguir) mostra os artigos avaliados, indicando autores, ano de publicação, títulos e países ou região dos respectivos artigos. Verifica-se que a participação da Espanha, Itália e Reino Unido em seis artigos e o que se nota é que não houve participação de autores brasileiros no tema avaliado dentro da base de pesquisa escolhida. Provavelmente porque EC relacionada com energia solar fotovoltaica é um tema ainda recente de pesquisa.

Quadro 1 – Artigos avaliados: autores, ano de publicação, títulos e países

Nº	Autores/Ano	Títulos	Países/Região
1	Agarwal et al. (2020)	Synergistic biorefinery of <i>Scenedesmus obliquus</i> and <i>Ulva lactuca</i> in poultry manure towards sustainable bioproduct generation	Índia
2	Bist, Sircar e Yadav (2020)	Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and management	Índia
3	Farrell et al. (2020)	Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules	Reino Unido
4	Herrero-Gonzalez et al.	Highly concentrated HCl and NaOH from brines using electro dialysis with bipolar membranes	Espanha
5	Li et al. (2020)	A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming	Singapura

Nº	Autores/Ano	Títulos	Países/Região
6	Lisperguer et al. (2020)	Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: open and closed-loop material flow scenarios	Espanha
7	Longo, Cellura e Girardi (2020)	Life cycle assessment of electricity production from refuse derived fuel: A case study in Italy	Itália
8	Mathur, Singh e Sutherland (2020)	Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis	Estados Unidos da América (EUA)
9	Micari et al. (2020)	Towards the implementation of circular economy in the water softening industry: A technical, economic and environmental analysis	Alemanha/Itália
10	Ng e To (2020)	A system thinking approach to stimulating and enhancing resource efficiency and circularity in households	Reino Unido
11	Albertí et al. (2019)	Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels	Espanha/China
12	Charles et al. (2019)	Sustainable energy storage for solar home systems in rural Sub-Saharan Africa – a comparative examination of lifecycle aspects of battery technologies for circular economy, with emphasis on the South African contexto	Reino Unido/África do Sul / Canadá
13	Corcelli et al. (2019)	Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean: an LCA comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation	Itália/ Espanha/ Alemanha
14	Cusenza et al. (2019)	Reuse of electric vehicle batteries in buildings: an integrated load match analysis and life cycle assessment approach	Itália
15	Mendoza et al. (2019)	Sustainability assessment of home-made solar cookers for use in developed countries	Reino Unido/ Espanha
16	Proskuryakova e Ermolenko (2019)	The future of Russia's renewable energy sector: trends, scenarios and policies	Rússia
17	Salim et al. (2019)	Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: a systematic literature review	Austrália
18	Savvilotidou et al. (2019)	Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash	Grécia
19	Slorach et al. (2019)	Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste	Reino Unido
20	Yousef et al. (2019)	Sustainable technology for mass production of Ag nanoparticles and Al microparticles from damaged solar cell wafers	Lituânia
21	Bobba et al. (2018)	Life cycle assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows	Itália/ Holanda
22	Charles et al. (2018)	Platinized counter-electrodes for dye-sensitised solar cells from waste thermocouples: a case study for resource efficiency, industrial symbiosis, and circular economy	Reino Unido
23	Dominguez et al. (2018)	LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework	Espanha
24	Sica et al. (2018)	Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy	Itália
25	Kilkiş e Kilkiş (2017)	Integrated circular economy and education model to address aspects of an energy-water-food nexus in a dairy facility and local contexts	Turquia

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Foram contabilizados 132 autores nos artigos, sendo que nove autores participaram da elaboração de dois trabalhos: A. Irabien, R. G. Charles, P. Douglas, M. A. Cusenza, J. Rieradevall, A. Azapagic, S. Longo, M. Cellura e R. D. Martín. Os demais autores participaram apenas de um

artigo. A média foi aproximadamente cinco autores por artigo e, nos extremos têm-se três artigos com dois autores cada e um artigo com onze autores, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de autores por artigo

Qtde de autores	Qtde de artigos	Total de autores
2	3	6
3	3	9
4	5	20
5	8	40
6	1	6
7	3	21
10	1	10
11	1	11
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>123</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Quanto a importância dos periódicos avaliados, os principais periódicos com frequência de duas vezes ou mais estão todos enquadrados no estrato Qualis A1, período 2013-2016, e têm como fator de impacto mínimo 7.145, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Periódicos pesquisados

Periódicos	Quantidade	Qualis 2013-2016	Fator de impacto
Journal of Cleaner Production	6	Administração A1	9.297
Science of The Total Environment	3	Ciências ambientais A1	7.963
Renewable and Sustainable Energy Reviews	2	Administração A1	14.982
Resources, Conservation and Recycling	2	Administração A1	10.204
Waste Management	2	Administração A1	7.145
Demais 10 periódicos	10		
<b>Total</b>	<b>25</b>		

Fonte: Dados da pesquisa

Foram catalogadas 138 palavras-chave e as mais citadas foram: *circular economy* (17); *life cycle assessment* (LCA) (9); *photovoltaic* (4); *recycling* (3); e com duas citações, as palavras *critical materials*; *end-of-life management*; *environmental impact(s)*; *photovoltaic solar energy*; *renewable energy*; *solar energy*; *sustainable development*; *waste management*. Os artigos foram classificados nos temas “geração e uso de energia solar fotovoltaica”; “recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica”; e “comparação com a geração de outras formas de energia”. Observa-se que o tema recuperação de material envolve tanto o processo de fabricação, instalação dos equipamentos quanto os resíduos desses equipamentos após o fim

de vida. O quadro 2 ( a seguir) mostra os objetivos, as abordagens utilizadas nas pesquisas e os respectivos autores dos artigos.

Quinze desses artigos abordaram o tema geração e uso de energia solar fotovoltaica: uso de energia solar; pesquisas sobre a produção de alimentos; produção de fertilizantes; reciclagem de resíduos em residências; fornecimento de água quente; fogões solares caseiros em substituição aos micro-ondas. Três artigos com temas mais amplos, fontes de energia híbridas; energia renovável da Rússia; e a relação energia, água e alimento. Quatro artigos sobre o uso de baterias, bateria fotovoltaica acoplada a cadeia produtiva; reaproveitamento de baterias de veículos elétricos e baterias de Chumbo (Pb)-ácido.

Os artigos relataram como fatores que poderão incentivar a EC desde soluções agrícolas; fontes de energia híbridas; produção e recuperação de insumos; tratamento de efluentes; aumento de taxas de reciclagem; redução de impactos ambientais; disponibilidades e reaproveitamento de produtos/equipamentos de outras linhas industriais; até incentivo educacional em uma universidade. Os aspectos avaliados dentro do sistema de energia elétrica fotovoltaica mostraram-se bem amplos e dentro de uma extensa gama, fato esse corroborado por Santos, Shibao e Silva (2019) que citaram que a EC envolve uma grande variedade de contextos e por Turkeli et al. (2018) afirmando que abrange muitos campos de domínios do conhecimento.

O tema recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica apresentou oito artigos, sendo sete artigos sobre processos, recuperação de material e energia encontrados nos módulos de silício cristalino; utilização do ciclo de material em malha fechada; resíduos de painéis do sistema de energia solar em fim de vida; produção de vitrocerâmica usando vidro de equipamentos fotovoltaicos e cinzas leves de linhita; tecnologia para separação, síntese e recuperação de alumínio, prata e substrato de silício; recuperação de platina; recuperação de painéis já utilizados para a construção de novos painéis. Um artigo identificou *drivers*, barreiras e facilitadores para o gerenciamento de fim de vida de sistemas de energia solar fotovoltaica e de baterias de armazenamento de energia. O quadro 3 (na página 305) mostra esses artigos.

Quadro 2 – Artigos sobre geração e uso de energia fotovoltaica

Nº	Objetivo	Abordagem	Autores/Ano
1	Uso de energia solar para o cultivo de algas	Soluções agrícolas incorporando uma gestão eficiente de resíduos e a geração de matéria	Agarwal et al., 2020
2	Produção de ácido clorídrico (HCl)	Produção de HCl se enquadrando nos princípios da economia circular	Herrero-Gonzalez et al., 2020
3	Fotocatálise para o reuso de águas cinzas	Redução dos encargos ambientais na gestão de águas cinzas dentro de uma estrutura de pensamento restaurativo de economia circular do uso da água	Dominguez et al., 2018
4	Telhados em espaços urbanos para produção agro-urbana de alimentos e geração de energia fotovoltaica	Ambos os sistemas são favoráveis e contribuem para a diminuição dos impactos ambientais	Corcelli et al., 2019
5	Produção de fertilizantes derivados de resíduos de cerveja	Energias renováveis e a valorização dos resíduos podem trazer benefícios para a produção de alimentos e facilitar a economia circular	Li et al., 2020
6	Energia solar e reciclagem de resíduos em residências	Menor impacto ambiental no uso simultâneo de eletricidade gerada a partir de resíduos e melhoria da eficiência de recursos e circularidade nas famílias	Ng e To, 2020
7	Fornecimento de água quente	Melhorias em categorias de impacto global, como aquecimento global, destruição da camada de ozônio e formação de ozônio fotoquímico	Albertí et al., 2019
8	Fogões solares caseiros em substituição aos micro-ondas em países desenvolvidos	Os fogões representam uma oportunidade para motivar mudanças comportamentais em direção a uma economia circular e sustentabilidade	Mendoza et al., 2019
9	Fontes de energia híbridas: energia solar e geotérmica	Fontes de energia híbridas seguem o conceito de economia circular que é planejada para diminuir a utilização de matérias-primas e geração de resíduos	Bist, Sircar e Yadav, 2020
10	Energia renovável da Rússia	Uso da tecnologia permitiria reduzir a dependência de tecnologias importadas, obter vantagens competitivas e promover o crescimento econômico	Proskuryakova e Ermolenko, 2019
11	Relação energia, água e alimento em uma fábrica de laticínios fundada por uma universidade	Economia circular integrada e modelo de educação para abordar aspectos da relação energia-água-alimento	Kilkis e Kilkis, 2017
12	Bateria fotovoltaica acoplada, a cadeia de destilação multiefeito (MED) e a cadeia de osmose reversa e destilação por membrana (RO-MD)	Para reduzir o impacto ambiental dos setores industriais, estratégias circulares devem ser implementadas para purificar os efluentes e recuperar as matérias-primas	Micari et al., 2020
13	Baterias reaproveitadas de veículos elétricos como sistema de armazenamento de energia em edifícios	Potencial sinergia dentro dos princípios da economia circular e da simbiose industrial, entre a construção civil e o setor automotivo	Cusenza et al., 2019
14	Baterias reaproveitadas de veículos elétricos como sistema de armazenamento de energia em residências	Benefícios ambientais da adoção de baterias para aumentar o autoconsumo fotovoltaico em uma casa estão em linha com os princípios da economia circular	Bobba et al., 2018
15	Baterias de Pb-ácido, para armazenamento de energia doméstica de pequena escala na África do Sul	Baterias de Pb-ácido, estão disponíveis na fabricação nacional e de baixo custo	Charles et al., 2019

Fonte: Dados da pesquisa

Os artigos relataram como fatores que poderão incentivar a EC que de uma forma geral, podem ser resumidos como valorização de resíduos focando na recuperação de material e energia e os consequentes benefícios ambientais, econômicos e sociais. Nesse contexto Akcil, Agcasulu e Swain (2019) citaram, como as matérias-primas são cruciais para um forte crescimento industrial e competitividade, no cenário dos metais críticos, a EC é vital para tecnologias sustentáveis de processamento, reutilização, reciclagem e recuperação. Por outro lado, a reciclagem de resíduos fotovoltaicos ainda está em um estágio inicial globalmente, tanto em termos de infraestruturas físicas quanto em termos normativos, conforme Gautam, Shankar e Vrat (2021).

Quadro 3 – Artigos sobre recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica

Nº	Objeto	Abordagem	Autores/Ano
1	Recuperação por pirólise de material e energia encontrados nos módulos de silício cristalino	Processos mais eficientes para reciclar módulos de silício cristalino	Farrell et al., 2020
2	Utilização do ciclo de material em malha fechada baseado nos princípios de <i>cradle-to-cradle</i>	Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	Lisperguer et al., 2020
3	Resíduos de painéis do sistema de energia solar em fim de vida podem ter valor como potencial matéria-prima	Uso dos resíduos podem reduzir o potencial de aquecimento global (GWP), ecotoxicidade, provocar economia de água e de eletricidade	Mathur, Singh e Sutherland, 2020
4	Produção de vitrocerâmica usando vidro de equipamentos fotovoltaicos e cinzas leves de linhita	Valorização de resíduos	Savvilitidou et al., 2019
5	Tecnologia para separação, síntese e recuperação de micropartículas de alumínio, nanopartículas de prata e substrato de silício a partir de <i>wafers</i> de células solares danificadas	A recuperação de produtos pode gerar ganhos econômicos e redução das emissões de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Yousef et al., 2019
6	Recuperação de platina para produzir eletrodos catalíticos para células solares	Processo de recuperação de platina pode trazer benefícios ambientais, econômicos e sociais	Charles et al., 2018
7	Recuperação de painéis já utilizados para a construção de novos painéis fotovoltaicos	Avaliação da sustentabilidade da gestão de final de vida de painéis	Sica et al., 2018
8	<i>Drivers</i> , barreiras e facilitadores para o gerenciamento de fim de vida de sistemas de energia solar fotovoltaica e de baterias de armazenamento de energia	Identificados dez <i>drivers</i> , 16 barreiras e 15 facilitadores para esse processo de gerenciamento	Salim et al., 2019

Fonte: Dados da pesquisa

Já o tema “comparação com a geração de outras formas de energia” mostrou dois artigos e ambos apresentaram que a geração de energia eletrovoltáica tem menor desempenho:

1) eletricidade gerada por *refuse derived fuel* (RDF ou combustível originado de resíduos secos) tem melhor desempenho do que a eletricidade da rede e da energia fotovoltaica, mas em contrapartida, tem pior desempenho para categorias de impacto ambiental relevantes, como

mudanças climáticas, toxicidade humana e formação de oxidante fotoquímico (LONGO; CELLURA; GIRARDI, 2020).

2) eletricidade gerada pela digestão anaeróbia de resíduos alimentares domésticos em comparação com as energias renováveis, como eólica e solar, tem menor demanda de energia, potencial de toxicidade e esgotamento de metais. No entanto, possui maior potencial de aquecimento global, eutrofização marinha, acidificação terrestre e formação de material particulado (SLORACH et al., 2019).

Uma sugestão interessante para a utilização de diferentes fontes de energias, aproveitando as respectivas vantagens, foi proposta por Bist, Sircar e Yadav (2020) na qual sugeriram que as configurações de energias renováveis híbridas são excepcionais para superar as desvantagens umas das outras, bem como acentuar a eficiência do sistema. A produção e exploração de energia por meio do conceito híbrido é um dos melhores exemplos de EC onde a energia é reaproveitada de forma circular.

O aumento de resíduos de painéis fotovoltaicos apresenta um novo desafio ambiental, mas também oportunidades sem precedentes para criar valor e buscar novos caminhos econômicos. Isso inclui a recuperação de matéria-prima e o surgimento de novas indústrias de energia solar fotovoltaica. Setores como a reciclagem de painéis fotovoltaicos serão essenciais na transição do mundo para um futuro de energia sustentável, economicamente viável e cada vez mais renovável. Para desbloquear os benefícios de tais indústrias, as bases institucionais devem ser estabelecidas a tempo de atender ao aumento esperado de resíduos desses painéis (IRENA; IEA-PVPS, 2016) pois, a avaliação desses resíduos é uma providência essencial para uma política de economia circular, regulação e tratamento de resíduos (GAUTAM; SHANKAR; VRAT, 2021).

Os desafios associados à geração e acumulação de resíduos na contemporaneidade, a alternativa EC foi colocada em prática para ajudar a resolver os problemas ambientais decorrentes da má gestão de resíduos, incentivando a circularidade dos recursos nos processos de produção. A EC é um conceito que continua a ganhar força ao longo dos anos como uma abordagem eficaz para alcançar a sustentabilidade (HALOG; ANIEKE, 2021).

## **5 Considerações finais**

O objetivo foi verificar na literatura se a geração e o uso de energia solar fotovoltaica poderão contribuir para com os preceitos de economia circular. Quinze artigos abordaram o

tema geração e uso de energia solar fotovoltaica, e relataram como fatores que poderão incentivar a EC. O tema recuperação de material dos equipamentos de geração de energia fotovoltaica apresentou oito artigos, sendo sete artigos sobre processos e um artigo identificou *drivers*, barreiras e facilitadores para o gerenciamento de fim de vida de sistemas de energia solar. Já o tema comparação com a geração de outras formas de energia apresentou dois artigos e ambos mostraram que a geração de energia avaliada tem melhor desempenho ambiental em alguns aspectos e pior em outros quando comparados com outros tipos de energias renováveis.

O que se pode inferir, dentro da base de dados pesquisada, é que a energia solar fotovoltaica, seja na geração de energia considerada uma fonte limpa e renovável, uso ou por meio de seus resíduos tanto de produção dos equipamentos ou após a vida útil, é uma tecnologia que poderá contribuir com a EC. Esta promove a circularidade dos equipamentos de energia fotovoltaica e seus resíduos ou assimilando equipamentos de outras tecnologias, como por exemplo as baterias de veículos elétricos pós uso, dessa forma mantendo o valor dos produtos, materiais e serviços em uso ativo o maior tempo possível (GOYAL; CHAUHAN; MISHRA, 2021).

Geissdoerfer et al. (2017) citaram que uma EC pode ser alcançada por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondicionamento e reciclagem de longa duração. Uma outra visão para implementação da EC, Pieroni, MCAloone e Pigozzo (2021) sugeriram que mudanças fundamentais são necessárias nos sistemas sociais, industriais e de consumo pois a EC é uma abordagem promissora para alcançar o desenvolvimento sustentável. Para indústria de energia solar fotovoltaica, conforme Gautam, Shankar e Vrat (2021), a EC pode ser alcançada por meio de avaliação do ciclo de vida, de substituição de materiais, da diversidade e de relações intersetoriais, e por créditos fiscais e subsídios de materiais.

Hart e Pomponi (2021) advertiram que a EC é indiscutivelmente um imperativo empresarial, mas a evidência definitiva para que seja possível apoiar a ideia de uma EC que atenda às metas sociais e ambientais precisa ainda ser desenvolvida. Por outro lado, Desing et al. (2020) citaram que o conceito de EC ganhou ampla difusão e popularidade, com uma crescente quantidade de artigos acadêmicos e publicações de grandes consultorias se tornando assim, um conceito importante para o desenvolvimento tanto da ciência como dos negócios.

Vier et al. (2021, p. 42) sugeriram que “[...] para que haja o maior engajamento das empresas e da sociedade, possibilitando o fechamento do círculo dos produtos e a parceria entre diferentes segmentos, se faz necessário a intervenção do governo, por meio de legislação, políticas públicas, incentivos fiscais e campanhas de conscientização”.

A pesquisa tem como limitante, a consulta somente a uma base de dados (*ScienceDirect*), o que limita as conclusões aqui encontradas, mas não deixa de ser relevante, pois a maioria dos periódicos consultados está classificada no estrato Qualis A1, período 2013-2016 e apresentam alto fator de impacto. Sugere-se a extensão deste estudo utilizando outras bases e comparar com os resultados aqui encontrados.

Outras sugestões de pesquisa foram apresentadas por Turkeli et al. (2018) que sugeriram pesquisas transdisciplinares de EC sobre o desenvolvimento, o apoio as práticas de modelos de negócios sustentáveis e sobre a aceitação do tema pelos consumidores.

## Referências

AGARWAL, A. et al. Synergistic biorefinery of *Scenedesmus obliquus* and *Ulva lactuca* in poultry manure towards sustainable bioproduct generation. **Bioresource Technology**, v. 297, 122462, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122462>.

AKCIL, A.; AGCASULU, I.; SWAIN, B. Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 622-637, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.031>.

ALBERTÍ, J. et al. Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels. **Sustainable Cities and Society**, v. 47, 101467, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101467>.

ALVES, L. G. S. et al. Responsabilidade compartilhada de resíduos sólidos: reflexões da implementação no município de Teresina-PI. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 18, n. 2, p. 03-25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v18i2.2490>.

ANEEL: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL: SIGA**. Brasília: Aneel, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 25 set. 2021.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**, 5a ed. Lisboa: Edições 70. Lda, 2009.

BIST, N.; SIRCAR, A.; YADAV, K. Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and management. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, 101054, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101054>.

BOBBA, S. et al. Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows. **Journal of Energy Storage**, v. 19, p. 213-225, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.008>.

CHARLES, R. G. et al. Sustainable energy storage for solar home systems in rural Sub-Saharan Africa – A comparative examination of lifecycle aspects of battery technologies for circular economy, with emphasis on the South African context. **Energy**, v. 166, p. 1207-1215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.053>.

CHARLES, R. G. et al. Platinized counter-electrodes for dye-sensitised solar cells from waste thermocouples: A case study for resource efficiency, industrial symbiosis and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1167-1178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.125>.

CORCELLI, F. et al. Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean. An LCA comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, p. 321-336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.040>.

CURTIS, T. L. et al. **A circular economy for solar photovoltaic system materials**: drivers, barriers, enablers, and U.S. Policy Considerations. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-74550, 2021. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74550>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CUSENZA, M. A. et al. Reuse of electric vehicle batteries in buildings: An integrated load match analysis and life cycle assessment approach. **Energy and Buildings**, v. 186, p. 339-354, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.032>.

DE ANGELIS, R. Circular economy and Paradox Theory: A business model perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, 124823, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124823>.

DESING, H. et al. A circular economy within the planetary boundaries: Towards a resourcebased, systemic approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 104673, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104673>.

DOMINGUEZ, S. et al. LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1047-1056, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.122>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **PNE 2050** – Plano Nacional de Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

FARRELL, C. C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, 109911, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>.

GAUTAM, A.; SHANKAR, R.; VRAT, P. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 65-77, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.011>.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GOYAL, S.; CHAUHAN, S.; MISHRA, P. Circular economy research: A bibliometric analysis (2000-2019) and future research insights. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, 125011, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125011>.

HALOG, A.; ANIEKE, S. A review of Circular Economy studies in developed countries and its potential adoption in developing countries. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n.1, p. 209-230, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00017-0>.

HART, J.; POMPONI, F. A Circular Economy: where will it take us? **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 127-141, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00013-4>.

HERRERO-GONZALEZ, M. et al. Highly concentrated HCl and NaOH from brines using electrodialysis with bipolar membranes. **Separation and Purification Technology**, v. 242, 116785, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116785>.

IRENA & IEA-PVPS. **End-of-Life management**: Solar photovoltaic panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

JABBOUR, A. B. L. S. Going in circles: new business models for efficiency and value. **Journal of Business Strategy**, v. 40, n. 4, p. 36-43, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/JBS-05-2018-0092>.

JABBOUR, C. J. C. et al. Stakeholders, innovative business models for the circular economy and sustainable performance of firms in an emerging economy facing institutional voids. **Journal of Environmental Management**, v. 264, 110416, p. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110416>.

KILKIS, S.; KILKIS, B. Integrated circular economy and education model to address aspects of an energy-water-food nexus in a dairy facility and local contexts. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1084-1098, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.178>.

KIVIRANTA, K. et al. Connecting circular economy and energy industry: A techno-economic study for the Åland Islands. **Applied Energy**, v. 279, 115883, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115883>.

LI, L. et al. A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, 121928, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121928>.

LISPERGUER, R. C. et al. Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: open and closed-loop material flow scenarios. **Sustainable Production and Consumption**, v. 23, p. 157-173, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.008>.

LONGO, S.; CELLURA, M.; GIRARDI, P. Life Cycle Assessment of electricity production from refuse derived fuel: A case study in Italy. **Science of The Total Environment**, v. 738, 139719, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139719>.

MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 104649, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104649>.

MEDEIROS, S. E. L. et al. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 104331, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104331>.

MENDOZA, J. M. F. et al. Sustainability assessment of home-made solar cookers for use in developed countries. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 184-196, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.125>

MICARI, M. et al. Towards the implementation of circular economy in the water softening industry: A technical, economic and environmental analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 120291, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120291>.

NG, K. S.; TO, L. S. A systems thinking approach to stimulating and enhancing resource efficiency and circularity in households. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, 123038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123038>.

OLIVEIRA, F. R.; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 202-209, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.031>.

- PIERONI, M. P. P.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A. Circular Economy business model innovation: sectorial patterns within manufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, 124921, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124921>.
- PROSKURYAKOVA, L. N.; ERMOLENKO, G. V. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies. **Renewable Energy**, v. 143, p. 1670-1686, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.096>.
- RIGO, P. D. et al. Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil. **Renewable Energy**, v. 181, p. 39-50, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.031>.
- SALIM, H. K. et al. Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 537-554, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>.
- SANTOS, M. R.; SHIBAO, F. Y.; SILVA, F. C. Economia circular conceitos e aplicação. **Revista Eletrônica Gestão e Serviços**, v. 10, n. 2, p. 2808-2826, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15603/2177-7284/regs.v10n2p2808-2826>.
- SAVVILOTIDOU, V. et al. Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash. **Waste Management**, v. 90, p. 46-58, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.022>.
- SICA, D. et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, part 3, p. 2934-2945, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>.
- SLORACH, P. C. et al. Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 798-814, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.001>.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.
- Turkeli, S. et al. Circular economy scientific knowledge in the European Union and China: A bibliometric, network and survey analysis (2006–2016). **Journal of Cleaner Production**, v. 197, Part 1, p. 1244-1261, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.118>.
- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Outlook 2021 with Projections to 2050**. Washington: EIA, 2021. Disponível em: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO\\_Narrative\\_2021.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO_Narrative_2021.pdf). Acesso em: 19 abr. 2021.
- VIER, M. B. et al. Reflexões sobre a Economia Circular. **COLÓQUIO – Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, p. 27-47, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26767/colóquio.v18i4.2206>.
- WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 13-23, 2002.
- WEETMAN, C. **Circular economy**. 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_economy](https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_economy). Acesso em 14 mar. 2021.
- YOUSEF, S. et al. Sustainable technology for mass production of Ag nanoparticles and Al microparticles from damaged solar cell wafers. **Waste Management**, v. 98, p. 126-134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.019>.