

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

MATHEUS TODESCATT

PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E SUSTENTABILIDADE:
RECICLAGEM E ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.

ERECHIM

2025

MATHEUS TODESCATT

**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E SUSTENTABILIDADE:
RECICLAGEM E ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.**

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Professor Doutor Darlan Christiano Kroth

ERECHIM

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Todescatt, Matheus

Painéis Fotovoltaicos e Sustentabilidade: Reciclagem e Análise de Ciclo de Vida / Matheus Todescatt. -- 2025. 78 f.

Orientador: Doutor Darlan Christiano Kroth

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Erechim, RS, 2025.

1. Reciclagem. 2. Fotovoltaica. 3. Revisão de Literatura. 4. ACV. I. Kroth, Darlan Christiano, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

MATHEUS TODESCATT

**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E SUSTENTABILIDADE:
RECICLAGEM E ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.**

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 17/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Darlan Christiano Kroth - UFFS
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf - UFFS
Avaliador

Prof. Dr. André Luis da Silva Leite – UFSC
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me fortalecer nos momentos de dúvida e incerteza quanto às minhas capacidades de cumprir as exigências do mestrado. Sou profundamente grato à minha esposa, Francielli, por ter sido uma grande incentivadora para que eu ingressasse no mestrado e por todo o apoio emocional, pelas palavras de encorajamento e pelo carinho constante que tornaram essa jornada menos desafiadora.

Agradeço à Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental e aos professores que compartilharam seus conhecimentos ao longo do curso. Em especial, ao meu orientador, professor Darlan, por aceitar o desafio de me orientar, mesmo não sendo da área específica de estudo, e fazê-lo com maestria.

Sou grato, ainda, a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa caminhada, seja durante o processo seletivo, seja ao longo do curso, oferecendo dicas, ideias e análises. Destaco o professor Clevison e os colegas servidores da UFFS Cláudio, Tome, Lidiane e Wellington.

RESUMO

A dissertação proposta é composta por dois artigos que, de maneira complementar, explorarão diferentes aspectos da sustentabilidade dos painéis fotovoltaicos. O primeiro artigo consiste em uma Revisão Sistemática da Literatura, cujo objetivo, foi mapear o estado da arte sobre a reciclagem de painéis fotovoltaicos em nível internacional, identificando as principais tendências de pesquisa. Utilizando a base de dados *ScienceDirect*, foram consultadas publicações relevantes em periódicos de alto impacto, empregando uma abordagem qualitativa, aplicada e exploratória. O segundo artigo, por sua vez, realiza uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) de um painel fotovoltaico modelo TSM-405DE15M(II). A metodologia segue as diretrizes da ABNT NBR ISO 14040 e 14044, adotando uma abordagem "do berço ao túmulo" para avaliar o Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos (PAG100) de um painel fotovoltaico de silício monocristalino. O PAG100 da geração de eletricidade do painel ao longo de sua vida útil foi comparado ao da matriz elétrica brasileira, revelando que a tecnologia fotovoltaica apresenta um impacto cerca de 46% menor. Por meio da integração desses dois estudos, a dissertação oferece uma contribuição significativa para o campo da sustentabilidade do emprego dos painéis fotovoltaicos, proporcionando uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades associados à reciclagem e ao ciclo de vida desses dispositivos.

Palavras-chave: reciclagem; fotovoltaica; revisão de literatura; ACV.

ABSTRACT

The proposed dissertation consists of two articles that, in a complementary manner, will explore different aspects of the sustainability of photovoltaic panels. The first article is a systematic literature review aimed at mapping the state of the art regarding photovoltaic panel recycling at an international level, identifying key research trends. Using the ScienceDirect database, relevant publications from high-impact journals were consulted, employing a qualitative, applied, and exploratory approach. The second article, in turn, conducts a Life Cycle Assessment (LCA) of a TSM-405DE15M(II) photovoltaic panel. The methodology follows the guidelines of ABNT NBR ISO 14040 and 14044, adopting a cradle-to-grave approach to assess the Global Warming Potential over a 100-year horizon (GWP100) of a monocrystalline silicon photovoltaic panel. The GWP100 of the panel's electricity generation over its lifetime was compared to that of the Brazilian electricity mix, revealing that photovoltaic technology has an approximately 46% lower impact. Through the integration of these two studies, the dissertation provides a significant contribution to the field of photovoltaic panel sustainability, offering a comprehensive understanding of the challenges and opportunities associated with recycling and the life cycle of these devices.

Keywords: recycling; photovoltaics; literature review; LCA.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	QUESTÕES DE PESQUISA.....	12
1.3	OBJETIVOS.....	12
1.3.1	Objetivo geral.....	12
1.3.2	Objetivos específicos.....	12
2	METODOLOGIA.....	14
	REFERÊNCIAS.....	16
	CAPÍTULO I - RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA.....	18
1	INTRODUÇÃO.....	20
2	METODOLOGIA.....	22
3	RESULTADOS.....	24
3.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	31
3.1.1	Análise de ciclo de vida.....	32
3.1.2	Gestão de resíduos.....	33
3.1.3	Economia circular.....	35
3.1.4	Métodos de reciclagem.....	36
3.1.5	Recuperação de materiais.....	38
3.1.6	Legislações sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos.....	39
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
	REFERÊNCIAS.....	44
	CAPÍTULO II – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL NA PRODUÇÃO E USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA ABORDAGEM DE ACV.....	52
1	INTRODUÇÃO.....	53
2	ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	56
2.1	Fases da ACV.....	57
2.2	ACV de painel fotovoltaico.....	58
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	DESCRIÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	60
3.2	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO.....	60

3.3	ANÁLISE DE INVENTÁRIO.....	62
3.4	AVALIAÇÃO DO IMPACTO.....	64
3.5	INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	65
3.6	COMPARAÇÃO DO PAG100 NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	65
4	RESULTADOS.....	66
4.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71
	CONCLUSÃO.....	77

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Dias (2015), o conceito de desenvolvimento sustentável foi amplamente definido pela primeira vez no informe "Nosso Futuro Comum" da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CMMAD), publicado em 1987, também conhecido como Relatório Brundtland, como a capacidade de atender às necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades.

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), através do documento Transformando nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. O documento foi debatido e ratificado na Cúpula das Nações Unidas ocorrida em Nova York de 25 a 27 de setembro de 2015. Esse documento é composto por 17 objetivos e 169 metas que foram concebidos com base nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (Wedy, 2018).

Um destes 17 objetivos é dedicado à temática de energia: "Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos" (ONU, 2024). De acordo com Jr e Reis (2016), há várias décadas, a questão energética tem sido um tema central nas discussões sobre meio ambiente e na busca por um modelo de desenvolvimento sustentável.

Ainda, Jr e Reis (2016) ponderam que, a transição para uma matriz com maior utilização de recursos primários renováveis, se impõem, dentre outras ações, como indispensável para um desenvolvimento sustentável no cenário energético.

Reis (2017), conceitua fontes primárias de energia renováveis como aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida que sua utilização energética ou cuja gestão pode ser feita de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética.

Segundo Bicalho *et al.* (2018), existem diversas alternativas de fontes renováveis e "limpas" para a geração de energia que promovem o desenvolvimento sustentável, com a energia solar sendo uma das mais destacadas.

ANEEL (2005) nos dá que quase todas as fontes de energia são formas indiretas de energia solar e que esta energia pode ainda ser convertida diretamente

em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico.

De acordo com Reis (2017), a energia solar fotovoltaica é produzida pela conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. A célula solar fotovoltaica, ou fotocélula, é o componente central dessa tecnologia, sendo composta por camadas de material semicondutor, que geram uma tensão elétrica quando expostas à radiação solar.

Para Silva *et al.* (2021) a adoção de um sistema fotovoltaico (SFV) traz contribuições positivas ao considerar diversos aspectos sustentáveis: i) ambientalmente, o SFV oferece benefícios significativos, uma vez que não emite poluentes nem produz ruídos durante a geração de energia, sendo assim uma fonte limpa e renovável; ii) do ponto de vista social, essa fonte de energia pode ser aplicada em regiões remotas onde outras fontes convencionais não têm alcance, melhorando o acesso à eletricidade em áreas isoladas; e, iii) economicamente, os custos de implementação têm diminuído ao longo dos anos devido ao avanço tecnológico, tornando o SFV uma opção mais acessível e economicamente viável.

Vian (2021) entende que ao longo das últimas décadas, a tecnologia fotovoltaica apresentou um notável desenvolvimento. Esse avanço foi impulsionado por diversos fatores, tais como o crescente reconhecimento da importância das fontes renováveis e limpas de energia, a instabilidade nos preços dos combustíveis fósseis, a crescente demanda por energia, o aumento do custo da energia convencional e a confiabilidade que a energia solar oferece, entre outros motivos.

Complementando aspectos que levaram ao desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica nas últimas décadas, Reis (2017) acrescenta que a diminuição dos preços, o aumento da competição no mercado fotovoltaico, os consideráveis avanços na eficiência das células e os incentivos recentes à geração distribuída têm impulsionado de forma significativa o crescimento tanto em número quanto em capacidade instalada dos projetos fotovoltaicos.

A importância dos sistemas solares fotovoltaicos para a matriz energética é ilustrada por números: em janeiro de 2025, eles representaram 21,4% da potência total da matriz elétrica do Brasil (Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica, 2025) e atingiram um recorde de atendimento de 12,42% da carga

média do Sistema Interligado Nacional (SIN) (ONS, 2025). Em termos mundiais, cerca de 16,7% da produção de energia elétrica renovável em 2022 foi gerada por sistemas fotovoltaicos (International Renewable Energy Agency, 2024).

A União Europeia tem liderado o desenvolvimento e a adoção da tecnologia fotovoltaica desde a década de 1990. Com a vida útil de um painel fotovoltaico variando entre 25 e 30 anos, prevê-se um aumento significativo no número de painéis que alcançarão o fim de sua vida útil nos próximos anos (Vinayagamoorthi *et al.*, 2024). Estima-se que, mundialmente, serão geradas entre 1,7 a 8 milhões de toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos em 2030, e entre 60 e 78 milhões de toneladas em 2050, considerando cenários de perda regular e precoce (International Renewable Energy Agency, 2016).

Dessa forma, embora os sistemas fotovoltaicos tenham um papel fundamental nos setores energético, social e ambiental, é essencial analisar o destino final dos módulos fotovoltaicos, com ênfase em seu descarte e reciclagem. Além disso, é necessário avaliar a real sustentabilidade ambiental atribuída à energia fotovoltaica, pois, conforme destacado por Rossi *et al.* (2023), assim como outras tecnologias de energia renovável, os painéis fotovoltaicos contribuem para a emissão de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida. Ademais, essa não é a única preocupação ambiental associada a essas tecnologias, sendo fundamental considerar o consumo de recursos, a ocupação do solo e a liberação de diversos poluentes.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo justifica-se tendo em vista os grandes volumes de painéis fotovoltaicos que chegarão ao fim de suas vidas úteis nas próximas décadas e que a reciclagem destes equipamentos ainda é um campo emergente, com práticas e tecnologias diversas. O estudo busca mapear, por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), o panorama global das pesquisas existentes e a apresentar os trabalhos, salvo melhor juízo, com ineditismo, de maneira categorizada em 5 temas, direcionando futuras pesquisas na área.

A realização deste estudo também se justifica pela importância de evidenciar, por meio de um estudo de caso, o impacto ambiental do Potencial de Aquecimento

Global ao longo do ciclo de vida de um painel fotovoltaico. Esse impacto é analisado em 98% dos estudos de análise de ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, conforme Santoyo-Castelazo et al. (2021). Além disso, o trabalho busca contribuir para a reflexão científica sobre a sustentabilidade ambiental desses equipamentos. Conforme Rossi et al. (2023), as tecnologias de energia renovável geram emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em diferentes etapas de seu ciclo de vida, incluindo a fabricação, operação e desativação.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

Dado o contexto exposto acima, surgem algumas questões para pesquisa. No presente estudo, as questões orientadoras foram: o que foi pesquisado em âmbito internacional sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos? Quais linhas de pesquisas têm sido elaboradas sobre a temática de reciclagem de painéis fotovoltaicos? Qual o Potencial de Aquecimento Global (PAG) que painéis fotovoltaicos podem gerar ao longo de sua vida útil considerando uma perspectiva *cradle-to-grave* (berço ao túmulo)? Quais etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos apresentam as maiores contribuições para o impacto ambiental PAG?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a sustentabilidade ambiental dos painéis fotovoltaicos utilizados para geração de energia solar.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos, identificando as principais linhas de pesquisa desenvolvidas e suas abordagens sobre a reciclagem de painéis fotovoltaicos.
- b) Aplicar a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) a um painel fotovoltaico para quantificar seu Potencial de Aquecimento Global (PAG),

abrangendo todas as etapas, desde a fabricação até o descarte, e identificar as fases que mais contribuem para o impacto ambiental potencial de aquecimento global.

- c) Subsidiar a análise comparativa dos impactos ambientais entre a produção de energia elétrica fotovoltaica e a do Sistema Interligado Nacional (SIN).

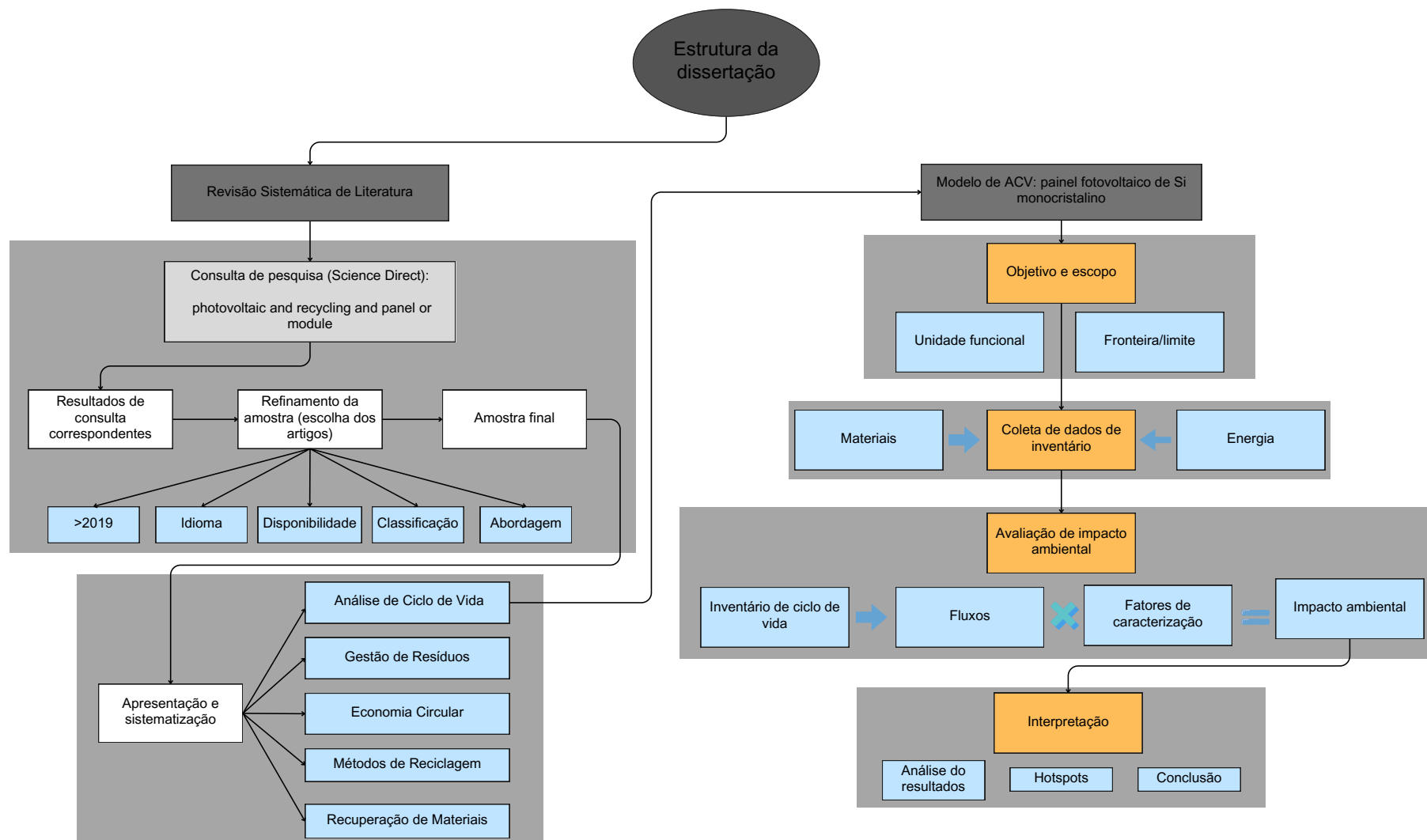
2 METODOLOGIA

A dissertação está estruturada em quatro capítulos, iniciando com esta parte introdutória. O segundo capítulo apresentará o artigo referente à Revisão Sistemática da Literatura (RSL), enquanto o terceiro capítulo será dedicado ao artigo de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Por fim, o quarto capítulo será reservado para a conclusão.

O primeiro artigo contribuirá para o alcance do objetivo específico “a”, enquanto o segundo artigo atenderá aos objetivos específicos “b” e “c”.

As metodologias aplicadas em cada artigo estão detalhadas nos próprios textos. A interconexão entre os dois estudos será assegurada pela complementaridade dos temas abordados, uma vez que a ACV de sistemas fotovoltaicos é uma das linhas de pesquisa identificadas na RSL. O *framework* dos elementos centrais desta dissertação é demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Framework da dissertação



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Energia solar**. 2005. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/energia_solar/energia_solar.htm. Acesso em: 02 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 01 fev. 2025.

BICALHO, Marlon S. et al. Análise de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede da Universidade Federal De Itajubá – Campus Itabira. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 95-105, 19 fev. 2018. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v7i1.57971>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/57971>. Acesso em: 05 ago. 2023.

DIAS, Reinaldo. **Sustentabilidade: Origem e Fundamentos; Educação e Governança Global; Modelo de Desenvolvimento**. São Paulo: Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 9788522499205. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522499205/>. Acesso em: 12 mai. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy statistics 2024**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf. Acesso em: 01 fev. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **End-of-life management: solar photovoltaic panels**. 2016. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. Acesso em: 02 set. 2024.

JR, Arlindo P.; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e sustentabilidade**. Barueri: Editora Manole, 2016. E-book. ISBN 9786555761313. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555761313/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

ONS. **Resultados da operação**. 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/recordes.aspx>. Acesso em: 06 fev. 2025.

ONU. **Objetivo de desenvolvimento sustentável**. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acesso em: 02 set. 2024.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 3a ed. Barueri: Editora Manole, 2017. E-book. ISBN 9786555762242. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555762242/>. Acesso em: 14 mai. 2023.

ROSSI, Federico et al. Comparative scenario-based LCA of renewable energy technologies focused on the end-of-life evaluation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 405, p. 136931, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136931>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623010892>. Acesso em: 23 fev. 2024.

SANTOYO-CASTELAZO, E. *et al.* Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: a case study for mexico. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 316, p. 128314, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128314>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621025294>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SILVA, Beatriz Lorrane Farias et al. Dimensionamento e viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. **Revista Produção Online**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 863-890, 20 set. 2021. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO. <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4342>. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/4342>. Acesso em: 05 ago. 2023.

VIAN, Ângelo. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555500592. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555500592/>. Acesso em: 16 mai. 2023.

VINAYAGAMOORTHY, R. et al. Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 111715, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723024545>. Acesso em: 23 fev. 2024.

WEDY, Gabriel. **Desenvolvimento sustentável na era das mudanças climáticas: um direito fundamental**. São Paulo: Editora Saraiva, 2018. E-book. ISBN 9788553172528. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788553172528/>. Acesso em: 14 mai. 2023.

CAPÍTULO I - RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA

RESUMO

Em janeiro de 2025, os sistemas solares fotovoltaicos representaram 21,4% da potência total da matriz elétrica do Brasil e atingiram um recorde de atendimento de 12,42% da carga média do Sistema Interligado Nacional (SIN). Em nível global, cerca de 16,7% da energia elétrica renovável em 2022 foi gerada por fontes fotovoltaicas. Socialmente, esses sistemas são úteis em áreas remotas, enquanto ambientalmente são vantajosos por não emitirem poluentes. No entanto, o descarte de painéis fotovoltaicos, que têm uma vida útil de 25 a 30 anos, apresenta desafios futuros, com uma previsão de até 78 milhões de toneladas de resíduos em 2050. O objetivo deste artigo é apresentar, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), as pesquisas globais referentes à reciclagem de painéis fotovoltaicos. Foi feita pesquisa avançada na base de dados *ScienceDirect* que resultou em 42 artigos, após a aplicação de critérios específicos. Os artigos foram classificados em cinco temas: i) Análise de Ciclo de Vida; ii) Gestão de Resíduos; iii) Economia Circular; iv) Métodos de Reciclagem; e, v) Recuperação de Materiais. A RSL permitiu uma compreensão mais profunda sobre a relevância e as oportunidades relacionadas à reciclagem de painéis fotovoltaicos. A revisão da literatura destacou a relevância da reciclagem de painéis fotovoltaicos, abordando os pilares da sustentabilidade e revelando a interdependência dos temas analisados. A análise do ciclo de vida dos painéis mostra que o *upcycling* oferece maiores benefícios ambientais, enquanto o *downcycling* se destaca economicamente. Métodos de reciclagem, como mecânica, química e térmica, apresentam altas taxas de recuperação de materiais, com até 95% de eficiência, e minimizam impactos ambientais, como a toxicidade. No contexto da economia circular, a reciclagem reduz a necessidade de extração de matérias-primas e a pegada de carbono, fortalecendo a sustentabilidade e a segurança energética. No entanto, em termos de marco legal, o estudo revelou que apenas a União Europeia possui regulamentação

específica para reciclagem de painéis, indicando a necessidade urgente de políticas semelhantes em outros países com grande capacidade instalada.

Palavras-chave: reciclagem; fotovoltaica; revisão de literatura.

1 INTRODUÇÃO

A importância energética dos sistemas solares fotovoltaicos pode ser entendida através de números: corresponde à 21,4% da potência total da matriz elétrica do Brasil (Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica, 2025), tendo como recorde a oferta de 12,42% da carga média do Sistema Interligado Nacional (SIN) em janeiro de 2025 (ONS, 2025). Olhando-se mundialmente, temos que cerca de 16,7% da produção global de energia elétrica a partir de fontes renováveis em 2022 originou-se da fonte fotovoltaica (International Renewable Energy Agency, 2024).

Para Silva *et al.* (2021), do ponto de vista social, essa fonte de energia pode ser aplicada em regiões remotas onde outras fontes convencionais não têm alcance, melhorando o acesso à eletricidade em áreas isoladas e, ambientalmente, o sistema fotovoltaico oferece benefícios significativos, uma vez que não emite poluentes nem produz ruídos durante a geração de energia, sendo assim uma fonte limpa e renovável.

Se por um lado é inegável a importância dos sistemas fotovoltaicos nas questões energética, social e ambiental, por outro há que ser ponderados os encargos ambientais dos equipamentos empregados na geração desta forma de energia, e em especial, os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como placas solares. De acordo com Rossi *et al.* (2023), os painéis fotovoltaicos, assim como outras tecnologias de energias renováveis, contribuem para emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, além de levantarem preocupações ambientais adicionais, como o consumo de recursos, a ocupação da terra e a emissão de diversos poluentes.

Além destes impactos, deve-se considerar o futuro dos módulos fotovoltaicos. A União Europeia tem estado na vanguarda do desenvolvimento e adoção da tecnologia fotovoltaica desde a década de 1990. Considerando que a expectativa de vida de um painel fotovoltaico varie entre 25 e 30 anos, é previsto um aumento significativo no número de painéis que chegarão ao final de sua vida útil nos próximos anos (Vinayagamoorthi *et al.*, 2024).

Estima-se que mundialmente serão geradas, num cenário de perda regular e precoce, respectivamente, entre 1,7 a 8 milhões de toneladas de resíduos de

módulos fotovoltaicos no ano de 2030 e, em 2050, entre 60 e 78 milhões de toneladas (International Renewable Energy Agency, 2016).

O cenário de perda precoce é plausível tendo em vista que, apesar da expectativa de vida teórica de 25 anos, a vida útil prática dos módulos fotovoltaicos pode ser mais curta devido a influências sociais, ambientais e econômicas, que podem levar a substituições antecipadas antes que a potência de saída degrade para 80% (Tan *et al.*, 2024).

Observa-se que a literatura ainda apresenta imprecisão sobre a reciclagem de painéis fotovoltaicos, com práticas, tecnologias e entendimentos diversos. Considerando a relevância do tema e a necessidade de um entendimento mais aprofundado, justifica-se o empreendimento da realização de um estudo sobre o tema.

O objetivo deste artigo é apresentar, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), o que foi pesquisado globalmente e as linhas de pesquisa sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos.

Segundo Galvão e Ricarte (2019), realizar uma revisão da literatura é uma atividade fundamental no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e científicos. Este processo ajuda a evitar a duplicação de pesquisas e, quando conveniente, possibilita o reaproveitamento e a aplicação de estudos existentes em diferentes escalas e contextos.

2 METODOLOGIA

Para atendimento do objetivo, foi aplicada a metodologia de RSL, que segundo Galvão *et al.* (2014), trata-se de um tipo de investigação focada em questão bem definida, que visa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis. Segundo Barbosa *et al.* (2019), um protocolo de pesquisa deve ser desenvolvido antes da execução de qualquer revisão sistemática.

O protocolo desta RSL iniciou com as questões de pesquisa: o que foi pesquisado em âmbito internacional sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos e quais linhas de pesquisas têm sido elaboradas sobre a temática de reciclagem de painéis fotovoltaicos?

Na sequência, foi selecionada a base de dados *ScienceDirect*. A seleção desta base ocorreu devido à presença de periódicos relevantes, com consideráveis Fatores de Impacto¹ (FI), como *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *Journal of Cleaner Production*, *Renewable Energy*, *Science of The Total Environment*, *Waste Management*, entre outros. Além disso, considerou-se a facilidade de acesso aos artigos desta base.

Foi realizada pesquisa avançada na base de dados *ScienceDirect* em 22 de fevereiro de 2024 utilizando-se as palavras-chaves previamente definidas “*photovoltaic and recycling and panel or module*”² no campo “*title, abstract or author-specified keywords*”³.

Como primeiro critério de seleção dos trabalhos desta RSL, foi estabelecido que suas publicações tivessem sido feitas a partir do ano de 2019. A limitação temporal foi adotada pois, para o campo acadêmico tecnológico, é especialmente importante considerar pesquisas recentes devido aos avanços rápidos e às mudanças na compreensão e práticas dentro deste campo, apoiadas nas legislações de reciclagem de eletrônicos, em especial de módulos fotovoltaicos, introduzidas na década passada ao redor do mundo. Também se justifica esta limitação temporal por ser o prazo no entorno do qual os primeiros módulos

1 O fator de impacto (FI) é um índice que mede a relevância de um periódico com base na média de citações de seus artigos nos últimos dois anos, sendo calculado pelo Journal Citation Reports (JCR).

2 Fotovoltaico e reciclagem e painel ou módulo

3 Título, resumo ou palavras-chave especificadas pelo autor

fotovoltaicos em operação no mundo atingiram a expectativa de vida útil esperada, que é de 25 a 30 anos. Foram encontrados 57 artigos.

Como segundo passo de triagem, foram considerados apenas trabalhos nos idiomas português, inglês ou espanhol. Terceiro critério de seleção foi a disponibilidade integral do trabalho na base de dados pesquisada. Dos 57 trabalhos encontrados inicialmente, 2 foram excluídos pois não estavam disponíveis integralmente na base de dados pesquisada.

O quarto critério de apuração foi que os trabalhos deveriam ser artigos publicados em periódicos classificados no estrato Qualis A1 da CAPES, no período de 2017-2020. A adoção deste critério visa assegurar a utilização de fontes que representem o ápice da qualidade, relevância e impacto acadêmico, uma vez que a metodologia adotada pela CAPES baseia-se em indicadores bibliométricos reconhecidos internacionalmente, como *CiteScore*, FI e índices h5 e h10 (CAPES, 2023). Foram excluídos 10 trabalhos por não atenderem a este critério.

Por fim, o quinto e último critério de seleção, foi que o trabalho abordasse especificamente a reciclagem de painéis fotovoltaicos. Os trabalhos restantes tiveram seus títulos e *abstracts/resumos* examinados para verificação da adequação ao critério de tratarem especificamente sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos, a fim de selecionar os textos para leitura completa. Neste critério foram descartados 3 trabalhos que são artigos envolvendo: tecnologia de renovação para painéis fotovoltaicos (Poulek *et al.*, 2023); novo mecanismo de limpeza de painéis solares (Myyas *et al.*, 2022); problemas críticos de sustentabilidade ligados à produção de turbinas eólicas, módulos solares fotovoltaicos, veículos elétricos e baterias de íons de lítio (Huber; Steininger, 2022).

Durante a leitura dos textos, observou-se que a discussão girava em torno de cinco temas. Buscando uma sistematização, os trabalhos foram categorizados nos temas: i) Análise de Ciclo de Vida; ii) Gestão de Resíduos; iii) Economia Circular; iv) Métodos de Reciclagem; e, v) Recuperação de Materiais de módulos fotovoltaicos.

Este estudo classifica-se, quanto à natureza, aplicada; quanto à abordagem, qualitativa; quanto aos objetivos, exploratório; quanto aos procedimentos técnicos, pesquisa bibliográfica, mediante o instrumento de RSL.

3 RESULTADOS

No quesito contribuição por países, a Austrália e a China têm ambos oito trabalhos, enquanto a Índia conta com seis. Os Estados Unidos e a Itália também mostram uma presença significativa, contribuindo com cinco artigos cada, enquanto o Brasil oferece três. Outros países que aparecem na lista incluem França e México, cada um com dois artigos, e Bélgica, Coreia do Sul, Grécia, Malásia, Tailândia, Alemanha, Finlândia, Israel e Taiwan, cada um com um artigo. É notável a ausência de artigos do Japão e a escassez de artigos da Alemanha (1), respectivamente o terceiro e o quarto países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo (International Renewable Energy Agency, 2024).

Na análise dos artigos registrou-se um total de 181 autores envolvidos, dos quais 17 contribuíram para a elaboração de dois trabalhos e três autores (Masud Behnia, Nazmul Huda e Sajjad Mahmoudi) participaram em quatro trabalhos. Os demais autores contribuíram com apenas um artigo cada. A média de autores por artigo foi de aproximadamente 4,3, com extremos representados por quatro artigos com 2 autores e um artigo com 11 autores. Não há artigos com apenas um autor. A maioria dos artigos (onze) possuem 5 autores.

No que diz respeito à relevância, os periódicos dos trabalhos selecionados apresentam, em 13 de abril de 2024, um fator de impacto mínimo de 6,7 e um *CiteScore* mínimo de 12, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Periódicos e indicadores dos trabalhos selecionados

Periódicos	Quantidade	Fator de impacto	CiteScore
Journal of Cleaner Production	9	11.1	18.5
Resources, Conservation and Recycling	8	13.2	20.3
Solar Energy Materials and Solar Cells	7	6.9	12.7
Waste Management	5	8.1	15.1
Renewable Energy	4	8.7	16.1
Solar Energy	3	6.7	13.1

Periódicos	Quantidade	Fator de impacto	CiteScore
Renewable and Sustainable Energy Reviews	2	15.9	26.3
Journal of CO ₂ Utilization	2	7.7	12
Applied Energy	1	11.2	21.1
Science of the Total Environment	1	9.8	16.8
Total	42		

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Foram registradas 224 palavras-chave, destacando-se as seguintes: *Recycling* (19); *Photovoltaic* (9); *Life cycle assessment*⁴ (6); *End-of-life*⁵ (6); *Circular economy*⁶ (6); *Sustainability*⁷ (4); *Solar energy*⁸ (4); *Photovoltaic panels*⁹ (4). As demais palavras-chave receberam três ou menos citações.

Buscando uma sistematização, os trabalhos foram categorizados nos temas Análise de Ciclo de Vida, Gestão de Resíduos, Economia Circular, Métodos de Reciclagem e Recuperação de Materiais de módulos fotovoltaicos.

O quadro 1 apresenta os autores, as abordagens empregadas e os temas sobre os quais os trabalhos versam.

4 Análise de ciclo de vida

5 Fim de vida

6 Economia circular

7 Sustentabilidade

8 Energia solar

9 Painéis fotovoltaicos

Quadro 1 – Autores, ano de publicação, abordagem e temas

Autores/Ano	Abordagem	Temas
ROSSI et al., 2023	Comparados desempenhos ambientais de três sistemas de energias renováveis existentes: uma central fotovoltaica, uma eólica e uma central geotérmica. Foi desenvolvido um modelo de análise do ciclo de vida baseado em cenários.	Análise De Ciclo De Vida
SANTOYO-CASTELAZO et al., 2021	Primeiro estudo de análise do ciclo de vida para a avaliação de um sistema fotovoltaico conectado à rede no México, realizado a partir de uma perspectiva do berço ao túmulo.	Análise De Ciclo De Vida
KREBS-MOBERG et al., 2021	Análise dos impactos dos painéis de silício multicristalino (m-Si), filme fino orgânico (OPV) e de película fina de perovskita (PSC) ao longo da vida útil de cada produto usando um modelo de sistema do berço ao túmulo.	Análise De Ciclo De Vida
OTENG et al., 2023	Primeiro quadro com abordagem conceitual e metodológica para análise do ciclo de vida (ACV) em análises relacionadas com políticas e transportes.	Análise De Ciclo De Vida E Gestão De Resíduos
LI et al., 2023	Avaliados e comparados de forma abrangente, por meio de uma análise do ciclo de vida (ACV), os custos e benefícios das tecnologias de reciclagem mecânica, química e térmica.	Análise De Ciclo De Vida E Métodos De Reciclagem
DIAS et al., 2022	Avalia os aspectos técnicos de um novo método de processamento, simples, econômico e ecologicamente correto enquanto utiliza a análise do ciclo de vida e o custo do ciclo de vida para avaliar os impactos ambientais e as perspectivas econômicas, respectivamente.	Análise De Ciclo De Vida E Métodos De Reciclagem
MAANI et al., 2020	Analisa os impactos ambientais de diferentes métodos de reciclagem para painéis de silício cristalino (c-Si) e de telureto de cádmio (CdTe).	Análise De Ciclo De Vida E Métodos De Reciclagem
FTHENAKIS et al., 2020	Fornece uma atualização de um artigo de 2004 do autor principal, sobre o impacto do ciclo de vida do cádmio em células fotovoltaicas de CdTe e expande-o para a recuperação de recursos e eventos anormais.	Análise De Ciclo De Vida E Recuperação De Materiais

Autores/Ano	Abordagem	Temas
KASTANAKI et al., 2022	Aborda as questões “quando grandes quantidades de resíduos de painéis serão geradas nos países da União Europeia (UE) e qual será a contribuição de cada?” e levanta a necessidade de definir-se um calendário para iniciar uma indústria de reciclagem economicamente viável para resíduos de painéis fotovoltaicos na UE.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos E Economia Circular
MAHMOUDI et al., 2019b	Estimativa do fluxo de resíduos fotovoltaicos entre os anos 2031–2047 com base na instalação real dos módulos fotovoltaicos de 2001 a 2018 e no fornecimento de um modelo de previsão aplicável a quatro cenários principais para projetar os resíduos gerados entre 2048 e 2060 no contexto australiano.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos E Economia Circular
DOMÍNGUEZ et al., 2019	Quantifica o futuro resíduo fotovoltaico dos 69,7 GW relatados como grandes projetos fotovoltaicos (≥ 1 MW) nos Estados Unidos da América (EUA) no final de 2015, incluindo não apenas os módulos, mas também o balanço do sistema.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos E Economia Circular
MAO et al., 2024	Resumo da estrutura de pesquisa e as ferramentas comuns utilizadas na Análise de Ciclo de Vida (ACV), descreve a configuração da estrutura do painel fotovoltaico c-Si e rotas técnicas de reciclagem de módulos fotovoltaicos.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos E Métodos De Reciclagem
MAHMOUDI et al., 2020	Realiza uma avaliação inclusiva do ciclo de vida utilizando SimaPro 9.0.029 e uma análise de viabilidade econômica empregando o método de Fluxo de Caixa Descontado (DCF) para vários cenários.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos E Métodos De Reciclagem
MAHMOUDI et al., 2019a	Investiga sistematicamente pesquisas globais sobre módulos fotovoltaicos em final de vida para identificar lacunas para exploração futura.	Análise De Ciclo De Vida, Gestão De Resíduos, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais

Autores/Ano	Abordagem	Temas
LIM et al., 2022	Explora um processo de reciclagem ideal com alta eficiência de recuperação de recursos em escala de laboratório, que compreende três etapas principais: delaminação do módulo, ataque ácido e eletrodeposição sequencial. Os resultados adquiridos foram posteriormente aplicados em uma análise de ciclo de vida.	Análise De Ciclo De Vida, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
ANSANELLI et al., 2021	Realizada Análise do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o desempenho ambiental de um novo processo de reciclagem de painéis fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si), em fim de vida (EoL).	Análise De Ciclo De Vida, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
DIAS et al., 2021	Propõe reciclar resíduos fotovoltaicos usando delaminação com solvente orgânico seguido de procedimentos de downstream térmico e de lixiviação.	Análise De Ciclo De Vida, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
ACHARYA et al., 2024	Introdução de uma estrutura de otimização para logística reversa, especificamente para coleta de módulos solares fotovoltaicos, incluindo uma abordagem baseada em incentivos para o processo de coleta para painéis solares em fim de vida (EoL).	Gestão De Resíduos
YU et al., 2021	Estuda a estratégia locacional para instalações de reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida na perspectiva de várias partes interessadas com um caso na província de Zhejiang, China.	Gestão De Resíduos
PROTOPAPA et al., 2021	Investiga a possibilidade de aplicação de métodos de espectroscopia óptica para o reconhecimento e triagem de painéis fotovoltaicos (PVs) em fim de vida (EoL) coletados em estações de pré-tratamento de resíduos eletrônicos, onde chegam, hoje em dia, sem nenhum rótulo contendo informações sobre sua composição e estrutura.	Gestão De Resíduos
NAIN et al., 2020	Aborda o aspecto do próximo fluxo de resíduos fotovoltaicos, investigando a possibilidade de liberação de material de módulos solares em fim de vida usando uma abordagem integrada de revisão de literatura e de pesquisa com as partes interessadas.	Gestão De Resíduos

Autores/Ano	Abordagem	Temas
MAHMOUDI et al., 2021	Apresenta uma estrutura universal para o gerenciamento sustentável de cerca de 5.000 GW de produtos fotovoltaicos até 2050 e esclarece as diferentes fronteiras e elementos que influenciam a economia circular.	Gestão De Resíduos E Economia Circular
SALIM et al., 2019	Motivadores, barreiras e facilitadores para a gestão do fim da vida útil de sistemas solar fotovoltaico e de bateria de armazenamento de energia: uma revisão sistemática da literatura	Gestão De Resíduos E Economia Circular
ANUSUYA et al., 2023	Contém informações sobre o estado atual da reciclagem de resíduos de painéis fotovoltaicos, as várias tecnologias envolvidas na reciclagem e as implicações financeiras da reciclagem.	Gestão De Resíduos, Economia Circular E Métodos De Reciclagem
FIANDRA et al., 2019	Gerenciamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida com base em um processo eco sustentável avançado foi apresentado e discutido.	Gestão De Resíduos, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
THOMASSEN et al., 2022	Com base em uma extensa revisão da literatura, dez cenários de fim de vida com potenciais efeitos de aprendizagem são identificados e seus fluxos de materiais são quantificados usando análise de fluxo combinada de materiais e substâncias.	Economia Circular, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
NEVALA et al., 2019	Fragmentação eletro-hidráulica (EHF) é explorada como um estágio inicial de condicionamento de módulos fotovoltaicos (PV) para facilitar a recuperação de metais valiosos com o objetivo principal de produzir frações liberadas que sejam adequadas para a recuperação de materiais como silício (Si), prata (Ag), cobre (Cu), estanho (Sn), chumbo (Pb) e alumínio (Al).	Economia Circular, Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
CHEEMA et al., 2024	Discussão das tendências recentes em várias etapas de reciclagem fotovoltaica, enquanto os problemas associados são determinados para sugerir melhorias na tecnologia futura.	Métodos De Reciclagem
BRIAND et al., 2023	Estudado um processo de delaminação utilizando CO ₂ supercrítico para a reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida.	Métodos De Reciclagem

Autores/Ano	Abordagem	Temas
WU et al., 2023	Propõe um novo método combinando baixa temperatura e tratamento térmico para separar diferentes camadas em módulos fotovoltaicos.	Métodos De Reciclagem
BRENES et al., 2023	Relatado um método alternativo para separar o acetato de etileno vinil (EVA) da célula solar.	Métodos De Reciclagem
WANG et al., 2022	Resumo sistemático de tecnologias de reciclagem de painel fotovoltaico de silício cristalino em final de vida e parâmetros de condição em três seções: desmontagem dos módulos, delaminação dos módulos e reciclagem e reúso dos materiais.	Métodos De Reciclagem
PRASAD et al., 2022	Focado especialmente na otimização dos parâmetros para identificar i) um solvente eficiente para a dissolução do encapsulante, ii) posição do módulo para melhor dissolução, iii) o efeito da variação de temperatura na solubilidade, e iv) estudos de saturação de EVA.	Métodos De Reciclagem
BRIAND et al., 2022	Investiga o potencial da espuma de CO ₂ supercrítico no acetato de etileno vinil (EVA) em módulos fotovoltaicos como um meio seguro de desmontá-los, camada por camada.	Métodos De Reciclagem
TAO et al., 2022	Comentário em desacordo com os resultados obtidos na comparação de dois métodos de reciclagem.	Métodos De Reciclagem
LOVATO et al., 2021	Avaliação da eficiência do processo de delaminação por meio de testes realizados à pressão atmosférica, na presença de diferentes cossolventes. Testes comparativos foram realizados utilizando CO ₂ supercrítico (ScCO ₂).	Métodos De Reciclagem
PANG et al., 2021	Proposto de forma inovadora um novo método de inchamento e separação de filme EVA (Etileno Vinil Acetato) com micro-ondas para reciclagem de painéis solares fotovoltaicos.	Métodos De Reciclagem
YASHAS et al., 2023	Propõe uma estratégia abrangente de reciclagem de painel fotovoltaico de silício multicristalino em final de vida, com ênfase em recuperação de prata (Ag).	Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
SAH et al., 2023	Desenvolvimento de lingotes de silício de pequeno porte ($\phi = 0,5$ polegada, 1,0 polegada) produzidos a partir de silício recuperado do módulo solar de silício cristalino (c-Si) através da técnica de Sinterização por Plasma de Centelha (SPS).	Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais

Autores/Ano	Abordagem	Temas
AZEUMO et al., 2019	Módulos fotovoltaicos de silício multicristalino tratados com processos físico e químico com objetivo de recuperação de materiais.	Métodos De Reciclagem E Recuperação De Materiais
LIU et al., 2024	Demonstração de como a reciclagem é crucial para fechar o ciclo de oferta e procura de matérias-primas essenciais na indústria fotovoltaica.	Recuperação De Materiais
PRASAD et al., 2024	Propõe uma nova abordagem para tratar o componente nocivo chumbo, recuperando-o na sua forma menos tóxica, como PbO (óxido de chumbo (II)), com aplicações comerciais.	Recuperação De Materiais

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na tabela 2 são explicitadas as quantidades de trabalhos que abordaram sobre os temas categorizados.

Tabela 2 – Quantidade de trabalhos por temas

Tema	Artigos exclusivos sobre o tema	Artigos em conjunto com outros temas	Total
Análise de ciclo de vida	3	14	17
Gestão de resíduos	4	11	15
Economia circular	0	8	8
Métodos de reciclagem	10	16	26
Recuperação de materiais	2	11	13

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

3.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O levantamento dos estudos categorizados conforme os temas apresentados na Tabela 2 permitiu uma análise detalhada do que tem sido discutido na literatura sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Nos próximos itens, são sintetizados os principais achados de cada uma dessas categorias, destacando suas contribuições e implicações para o avanço das pesquisas na área.

3.1.1 Análise de ciclo de vida

A ACV é uma metodologia que avalia o impacto ambiental de um produto ou processo ao longo de todo o seu ciclo de vida, considerando fluxos de entrada e saída, como energia, materiais, resíduos e emissões (DIAS *et al.*, 2022).

Sob a ótica do sistema berço ao berço¹⁰, Mao *et al.* (2024), em uma comparação entre três cenários para painéis fotovoltaicos em fim de vida (aterro, reciclagem de maior valor (*upcycling*)¹¹ e reciclagem de menor valor (*downcycling*)¹²), traz que a carga ambiental¹³ varia entre os cenários, com o *upcycling* apresentando o menor impacto. Economicamente, o *downcycling* é o mais viável, seguido pelo *upcycling*, sendo o aterro o menos viável economicamente.

Em uma comparação de desempenhos ambientais de três sistemas de energias renováveis existentes, uma central fotovoltaica, uma eólica e uma central geotérmica, Rossi *et al.* (2023) revela que se o descarte for escolhido como cenário de fim de vida, os sistemas fotovoltaicos são os mais impactantes, seguidos pelos geotérmicos e eólicos. Com a reciclagem de materiais, a energia fotovoltaica fica entre a energia eólica e a geotérmica.

Em uma análise do ciclo de vida (ACV) de um sistema fotovoltaico de silício multicristalino (m-Si), montado em telhado no México, Santoyo-Castelazo *et al.* (2021) encontra uma pegada de carbono¹⁴ de 47.156 gCO₂-eq./kWh, principalmente proveniente da produção de painéis. Comparando com outros estudos, o painel fotovoltaico de m-Si apresenta emissões mais baixas. O estudo destaca os benefícios ambientais do m-Si e sugere vida útil padronizada de 30 anos para a ACV.

Usando um modelo de sistema do berço ao túmulo¹⁵, Krebs-Moberg *et al.* (2021) analisa os impactos dos painéis de silício multicristalino (m-Si), filme fino

10 Modelo de produção de economia circular, que reaproveita materiais para a fabricação de novos produtos.

11 Dar um novo propósito a materiais que seriam descartados, estendendo sua vida útil

12 Processo de reciclagem cuja qualidade dos materiais que compõem um produto é depreciada

13 Conjunto de impactos negativos que um produto ou processo gera sobre o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida.

14 Medida que calcula a emissão de carbono equivalente na atmosfera por uma pessoa, atividade, evento, empresa, organização ou governo.

15 Modelo de análise de ciclo de vida que contempla desde a extração de matérias-primas até o descarte final, abordando o ciclo de vida completo e considerando as entradas e saídas de cada etapa do processo.

orgânico (OPV) e de película fina de perovskita¹⁶ (PSC) ao longo da vida útil de cada produto. Concluíram que, apesar da vida útil mais curta e da menor eficiência, os painéis filme fino orgânico (OPV) e película fina de perovskita (PSC) superam os painéis de silício multicristalino (m-Si) em todas as categorias. Os painéis m-Si têm impactos finais dez vezes maiores do que os filmes finos para cenários de aterro. Os processos de fabricação contribuem significativamente para os impactos ambientais. Defendem ainda que os OPVs destacam-se como a melhor opção, equilibrando os custos ambientais e econômicos.

3.1.2 Gestão de resíduos

Gestão de resíduos refere-se ao conjunto de práticas, políticas e processos voltados para a coleta, triagem, processamento e reintegração de materiais descartados no ciclo produtivo.

Acharya *et al.* (2024) propõe uma estrutura para otimizar o lucro dos centros de coleta de resíduos fotovoltaicos para reciclagem, minimizando custos por meio de alocação eficiente de centros e planos de incentivos. Utilizando um modelo matemático, demonstra maior potencial de lucro com estratégias de cobrança centralizadas ou descentralizadas de forma otimizada em comparação com outras. No entanto, a distribuição desigual dos centros de recolha em Deli coloca problemas de acessibilidade. O modelo, adaptável a qualquer região, oferece informações valiosas para iniciativas de reciclagem fotovoltaica na Índia. Além disso, o modelo de otimização também sugere ao governo a incorporação de incentivos e preferências dos usuários, como recompensas monetárias para a devolução dos módulos fotovoltaicos e preferências por locais de entrega convenientes ou pela opção de coleta, tornando-o ainda mais sustentável.

Oteng *et al.* (2023) levanta que a responsabilidade alargada do produtor¹⁷ reduz as emissões de CO₂ através da reciclagem de materiais como o alumínio e o silício (Si). O transporte também afeta o impacto ambiental, sendo preferíveis distâncias mais curtas. Métodos de transporte de baixo impacto e energia renovável devem ser utilizados para minimizar o impacto ambiental dos resíduos fotovoltaicos.

¹⁶ Mineral de óxido de cálcio e titânio.

¹⁷ Conjunto de medidas tomadas para assegurar que cabe aos produtores dos produtos a responsabilidade financeira ou a responsabilidade financeira e organizacional pela gestão da fase resíduos do ciclo de vida de um produto.

Abordando as questões “quando grandes quantidades de resíduos de painéis serão geradas nos países da União Europeia (UE) e qual será a contribuição de cada?”, Kastanaki *et al.* (2022) levanta a necessidade de definir-se um calendário para iniciar uma indústria de reciclagem economicamente viável para resíduos de painéis fotovoltaicos na UE. Um esquema propõe negócios viáveis de reciclagem de painéis fotovoltaicos na Alemanha, Itália, França e Espanha entre 2024 e 2032. Outros oito países serão capazes de operar com sucesso plantas individuais de reciclagem de painéis fotovoltaicos entre 2037 e 2049, enquanto os demais podem precisar de parcerias para reciclagem até 2050.

Protopapa *et al.* (2021) defende que reconhecer a estrutura multicamadas original dos painéis fotovoltaicos é crucial para otimizar os processos de reciclagem, como combustão ou pirólise, ou protocolos de delaminação. As soluções futuras podem incluir a rotulagem de módulos fotovoltaicos com códigos RFID ou QR para fácil reconhecimento e reciclagem otimizada. A análise da composição em escala local de painéis desmantelados ajudará na engenharia de estações de tratamento locais, promovendo a simbiose industrial para a reutilização de materiais.

Em seu trabalho, Yu *et al.* (2021) apresenta dois cenários que comparam estratégias que envolvem o governo municipal e os produtores na reciclagem de módulos fotovoltaicos de 2016 a 2020. Embora os custos iniciais favoreçam o envolvimento municipal, o envolvimento dos produtores revela-se mais rentável a longo prazo devido ao aumento dos fluxos de resíduos. O documento defende o envolvimento proativo dos produtores no estabelecimento de um sistema de reciclagem, antecipando futuras regulamentações. Sugere a utilização de fábricas fotovoltaicas como centros de reciclagem para aumentar a rentabilidade.

Para Nain *et al.* (2020), a ausência de regulamentações federais e infraestrutura de reciclagem apresenta desafios para o gerenciamento de módulos solares em fim de vida (EoL). Um estudo revela que 80% dos produtores não possuem dados sobre o destino dos módulos pós-EoL, enquanto 76% dos produtores não reciclam, optando por vender para recicladores informais. No entanto, 84% manifestam interesse na reciclagem subsidiada. A investigação futura deverá aprofundar-se nas perspectivas das partes interessadas, especialmente

consumidores e fabricantes, para melhorar a gestão de resíduos solares fotovoltaicos EoL.

Em resumo, as recomendações convergem para a implementação de sistemas de reciclagem baseados em incentivos, responsabilidade do produtor, análise do ciclo de vida, tecnologias avançadas para identificação e separação de materiais, estratégias de reciclagem locais, e a mitigação de riscos ambientais.

3.1.3 Economia circular

Benefícios da reciclagem de painéis fotovoltaicos sob os enfoques econômico e social são demonstrados nos trabalhos, especialmente através da efetivação de uma economia circular. A filosofia da economia circular tenta fechar o ciclo da cadeia de suprimentos, reduzindo a necessidade de materiais virgens por meio da reutilização ou reciclagem de materiais existentes (SALIM *et al.*, 2019). Segundo Kastanaki e colaboradores (2022), ao adotar sistemas eficazes de coleta e reciclagem, os materiais recuperados podem ser reintegrados na produção de novos painéis fotovoltaicos, promovendo o fechamento do ciclo de materiais e, conseqüentemente, fortalecendo a economia. De acordo com Yashas e colegas (2023), a reciclagem de *wafers* de silício, vidro temperado e molduras de alumínio (Al), juntamente com a recuperação de metais como cobre (Cu) e prata (Ag) de um módulo fotovoltaico típico no fim de sua vida útil, desempenha um papel crucial na redução dos custos de fabricação, na promoção da produção sustentável de energia fotovoltaica, na garantia da segurança energética e na manutenção de uma economia circular coerente. Conforme observado por Ansanelli e colaboradores (2021), é possível recuperar e reutilizar esses materiais em diversas cadeias de produção ou reintegrá-los no setor fotovoltaico. Essa prática contribui para diminuir a exaustão de recursos e sustentar o aumento de instalações solares, em consonância com os princípios da Economia Circular. Benefícios sociais indiretos incluem aumento do emprego social conforme a indústria de reciclagem de resíduos de PV se desenvolve e reduções no consumo de eletricidade devido à energia recuperada (LI *et al.*, 2023).

Thomassen *et al.* (2022) avultam a importância de promover-se a economia circular, argumentando que a transição para energias renováveis está intimamente

ligada à transição para uma economia circular. Eles salientam que a reciclagem de módulos fotovoltaicos desempenha um papel crucial na redução da perda e na demanda adicional de materiais, sendo fundamental para sustentar essas transições a longo prazo. Porém, para Santoyo-Castelazo *et al.* (2021), além da Europa, especialmente na França e na Alemanha, há uma ausência de consenso dentro da indústria de sistemas fotovoltaicos em relação a essas iniciativas de economia circular.

3.1.4 Métodos de reciclagem

Conforme Li *et al.* (2023), existem três tecnologias convencionais de reciclagem para resíduos de painéis fotovoltaicos de Si (tecnologia predominante): reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem térmica.

Segundo Cheema *et al.* (2024), os processos de reciclagem existentes seguem a ordem de desmontagem, delaminação, extração de material e recuperação/purificação, resultando em rendimentos de aproximadamente 90% a 95%, gerando lucro com a reintrodução de materiais na indústria fotovoltaica e usado em outras aplicações de valor agregado, como catalisadores e fábricas de papel. Do ponto de vista ambiental, as tecnologias existentes de reciclagem fotovoltaica podem reduzir a eco toxicidade terrestre, a acidificação, o potencial de aquecimento global e o potencial de toxicidade humana em 74%, 37%, 26% e 24%, respectivamente.

Utilizando CO₂ supercrítico, Briand *et al.* (2023) estudou um processo de delaminação para a reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida. Os resultados mostram alta eficiência para EVA, moderada para E/MAA¹⁸ e inferior para POE¹⁹. O CO₂ supercrítico é promissor para módulos fotovoltaicos baseados em EVA e futuros módulos fotovoltaicos baseados em perovskita, mas é menos eficaz para polímeros insensíveis ao CO₂, como POE, destacando a dependência da química do polímero.

Yashas *et al.* (2023) faz uso de um catalisador Pt/AC, que facilita a recuperação eficiente de metal de módulos fotovoltaicos em final de vida usando apenas H₂ e ar, separando seletivamente Ag, Cu e Pb. Ao contrário dos métodos

¹⁸ Ionômeros de polietileno/ácido metacrílico)

¹⁹ Elastômero de poliolefina

tradicionais, evita produtos químicos agressivos como HNO_3 e cianeto, opera em condições suaves de pH, temperatura e pressão, com consumo mínimo de H_2 ou ar, prometendo uma solução sustentável para a reciclagem de painéis fotovoltaicos de silício cristalino.

Combinando baixa temperatura e tratamento térmico para separar diferentes camadas em módulos fotovoltaicos, o processo de Wu *et al.* (2023) remove efetivamente o EVA traseiro e a folha traseira em condições congeladas, facilitando a reciclagem de aproximadamente 95% da massa do módulo. Esta abordagem melhora a qualidade da recuperação e minimiza o impacto ambiental, oferecendo *insights* para o gerenciamento sustentável de recursos de módulos fotovoltaicos de c-Si residuais.

Li *et al.* (2023) defende que, em comparação com a deposição em aterro, todos os métodos de reciclagem (mecânico, químico e térmico) oferecem benefícios ambientais, sendo o tratamento térmico o que apresenta maiores vantagens. Os desafios incluem a baixa viabilidade econômica devido aos elevados custos ambientais e à imaturidade tecnológica. As sugestões incluem a adoção de materiais ecológicos, o desenvolvimento de tecnologia de tratamento de poluição e a oferta de subsídios para incentivar a reciclagem.

Em seu trabalho, Lovato *et al.* (2021), através dos métodos de processamento adotados, alcançaram alta pureza: a pressão atmosférica e a moagem de bolas produziram 93% de vidro, 91,5% de filamentos de chumbo e 93,2% de folha traseira. A recuperação de célula + EVA foi de 76,74%. O CO_2 supercrítico e a moagem de bolas melhoraram a pureza para 98,69% de vidro, 96,75% de filamentos de chumbo e 99,35% de folha traseira, com recuperação de célula + EVA de 85,77%. Ambos os processos alcançaram quase 100% de recuperação.

Pang *et al.* (2021) propõe de forma inovadora um novo método de inchamento e separação de filme EVA (Etileno Vinil Acetato) com micro-ondas para reciclagem de painéis solares fotovoltaicos. Ao explorar os diferentes coeficientes de absorção de micro-ondas e de expansão térmica dos componentes do painel fotovoltaico, foram determinadas as condições ideais para separação. O tricloroetileno na concentração de 4 mol/L, com temperatura de reação de 70°C e proporção sólido-líquido de 50 g/L, obteve separação completa em 2 horas. O estudo também aborda

a volatilidade da matéria orgânica, empregando refluxo de condensação para reciclagem. A análise do mecanismo de inchaço do EVA aprimorado por micro-ondas oferece insights para a reciclagem ecológica e eficiente de módulos fotovoltaicos.

3.1.5 Recuperação de materiais

Nos estudos analisados, um dos benefícios enfatizados sob a ótica ambiental está relacionado à conservação dos materiais na natureza, prevenindo sua exaustão. A reciclagem de módulos fotovoltaicos obsoletos pode reduzir o esgotamento dos recursos naturais (MAHMOUDI *et al.*, 2019b). Os painéis de silício cristalino incluem metais preciosos, como alumínio, cobre e prata, cujas reservas podem se esgotar no futuro (DIAS *et al.*, 2022).

Entre os elementos suscetíveis ao esgotamento, foi notável a frequência com que a prata (Ag) foi mencionada nos estudos. A reserva conhecida de Ag na Terra é de aproximadamente 560.000 toneladas e, com a taxa atual de mineração (27.000 toneladas por ano), ela se esgotaria em 21 anos (YASHAS *et al.*, 2023). Conforme apontado por Cheema e colegas (2024), a prata é um metal valioso com uma concentração na crosta terrestre de aproximadamente 0,07 ppm, mas tem havido uma discrepância notável entre a demanda e a oferta ao longo da última década, o que a coloca na categoria de metais escassos. Com base nas atuais taxas de expansão da energia solar, estima-se que até 2050, a quantidade total de prata utilizada em células fotovoltaicas representará cerca de 10% das reservas totais mundiais (NEVALA *et al.*, 2019).

Do ponto de vista ambiental e social, a reciclagem de painéis fotovoltaicos no final de sua vida útil resulta na diminuição das emissões tóxicas. De acordo com as conclusões de Cheema e colaboradores (2024), os módulos fotovoltaicos contêm metais pesados, como chumbo (Pb), cobre (Cu), prata (Ag) e alumínio (Al), os quais podem gerar danos ambientais significativos, incluindo poluição do ar, da água e do solo, além de representar uma ameaça à saúde humana e animal devido à sua toxicidade aguda. Por sua vez, Oteng *et al.* (2023) observam que o processo de reciclagem dos painéis solares ao término de sua vida útil representa uma alternativa mais sustentável em comparação com o descarte em aterros sanitários, visto que isso impede a disposição de substâncias perigosas e tóxicas nesses

locais. Essa prática pode evitar potenciais danos ao meio ambiente, incluindo a infiltração dessas substâncias no solo e nas águas subterrâneas, resultando em impactos adversos nos ecossistemas e na saúde humana por meio de efeitos fisiológicos e bioquímicos negativos.

Sob perspectivas ambientais e econômicas, Oteng e colaboradores (2023) trazem que os sistemas fotovoltaicos solares contêm metais preciosos e carcinogênicos, como telúrio, selênio, cobre, prata, chumbo, cromo, silício e cádmio, os quais necessitam de recuperação e reciclagem ao final de sua vida útil operacional para prevenir a poluição ambiental e para extrair os metais valiosos. Segundo Lovato e colegas (2021), os componentes dos módulos fotovoltaicos incluem materiais convencionais, como vidro, cobre (Cu) e alumínio (Al), além de substâncias críticas, como prata (Ag), e materiais altamente puros e intensivos em energia, como o *wafer* de silício (Si). A reutilização desses componentes pode reduzir a necessidade de extração de matérias-primas para a produção de painéis solares, resultando em benefícios econômicos e ambientais.

Ainda sob as óticas ambientais e econômicas, a literatura analisada destaca a redução do consumo de energia necessário para a produção de novos materiais através da reciclagem de painéis fotovoltaicos. De acordo com Acharya e colegas (2024), a reciclagem também tem o potencial de reduzir a pegada de carbono, uma vez que a recuperação de metais de resíduos eletrônicos requer apenas aproximadamente 10% a 15% da energia total necessária em comparação com a extração de metais de minérios naturais.

3.1.6 Legislações sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos

Pela revisão de literatura pode-se também ter um panorama das legislações referentes à reciclagem de módulos fotovoltaicos em final de vida nos 4 países e na União Europeia, que possuem as 5 maiores capacidades instaladas de energia solar fotovoltaica no ano de 2023, conforme International Renewable Energy Agency (2024): China – 609.351 MW; União Europeia – 254.868 MW; Estados Unidos – 137.725 MW; Japão – 89.077 MW; Índia – 72.767 MW.

Segundo Li e colaboradores (2023), a União Europeia (UE) se destaca ao estabelecer um enquadramento regulamentar específico para o tratamento de

resíduos de módulos fotovoltaicos, por meio da Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) (2012/19/UE). Em consonância, Acharya *et al.* (2024) indicam que em 2012, a UE incorporou os equipamentos fotovoltaicos à sua legislação sobre REEE, adotando o princípio da Responsabilidade do Produtor Estendida como elemento central desta diretriz. De acordo com o regulamento, é obrigatório que 85% do REEE seja valorizado, e 80% seja preparado para reutilização e reciclagem (UNIÃO EUROPEIA, 2012). Acharya *et al.* (2024) e Cheema *et al.* (2024) entendem que, além da UE, nenhum país importante, com uma parcela significativa de instalação ou meta de módulos fotovoltaicos, possui regulamentações específicas para lidar com painéis solares no fim de vida útil.

De acordo com Li *et al.* (2023), a China emergiu como líder global em tecnologias fotovoltaicas. Mas apesar disso, a China carece de incentivos e políticas específicas para lidar com esses resíduos. Conforme destacado por Mao e colaboradores (2024), em 2021, a China introduziu requisitos técnicos gerais para a reciclagem e recuperação de módulos fotovoltaicos (GB/T 39753-2021), estabelecendo padrões para taxas de recuperação e reutilização de materiais. No entanto, como observado por Cheema *et al.* (2024), o país não possui regulamentação específica para o gerenciamento de resíduos de PV, tratando-o dentro dessa estrutura legislativa geral.

Segundo Oteng *et al.* (2023), apesar da falta de uma política federal nos Estados Unidos, alguns estados, como Califórnia, Washington, Nova Jersey e Carolina do Norte, têm implementado legislação para a reciclagem de painéis solares fotovoltaicos no final de sua vida útil, enquanto outros, como Havaí e Rhode Island, ainda estão em processo de aprovação.

Lim *et al.* (2022) discutem como a Europa e o Japão implementaram políticas que incluem a reciclagem de painéis solares no final de sua vida útil, com exigências para que os fabricantes ou instaladores de sistemas fotovoltaicos financiem essa reciclagem ou contribuam para um fundo de descomissionamento. Eles destacam que a Diretiva Europeia de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos foi ampliada em 2012 para abranger produtos solares, permitindo altas taxas de reciclagem dos materiais utilizados nos painéis fotovoltaicos. Além disso, mencionam

a colaboração entre o fabricante de sistemas fotovoltaicos Next Energy e a empresa Marubeni no Japão, apoiados pelo Ministério do Meio Ambiente, para trabalhar na reutilização e reciclagem de painéis solares no final de sua vida útil, utilizando *blockchain* para garantir a rastreabilidade das células solares desde sua remoção inicial até a reciclagem final.

No Japão, a Associação Japonesa de Energia Fotovoltaica propôs uma estrutura de orientação em 2017 para que as partes interessadas na recuperação possam usar voluntariamente tratamentos apropriados para lidar com os módulos PV no final de sua vida útil (LI *et al.*, 2023).

De acordo com Acharya *et al.* (2024), embora a Índia tenha implementado uma regulamentação de resíduos eletrônicos em 2016, baseada na Lei de Proteção Ambiental de 1986 e no conceito de Responsabilidade Estendida do Produtor, essa regulamentação não abrange módulos fotovoltaicos e inversores. Apesar das diretrizes do Ministério de Energia Nova e Renovável para usinas de energia solar conectadas à rede exigirem que os desenvolvedores colem e descartem os painéis no final de sua vida útil, seguindo a regra de resíduos eletrônicos, os resíduos fotovoltaicos ainda não estão contemplados nessa regulamentação.

Os trabalhos mencionados convergem em destacar a necessidade urgente de que os países desenvolvam legislação específica e políticas públicas voltadas para a reciclagem de painéis fotovoltaicos, incentivando fornecedores a adotar práticas de economia circular e a tratar adequadamente os resíduos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão da literatura permitiu uma compreensão mais profunda sobre a relevância e as oportunidades relacionadas à reciclagem de painéis fotovoltaicos. Esta prática aborda questões ambientais, econômicas e sociais, abrangendo, portanto, os três pilares fundamentais da sustentabilidade. Pode-se também captar a interdependência entre os 5 temas categorizados neste estudo.

A análise do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos revela variações significativas nos impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos dependendo do cenário de fim de vida escolhido. Os processos de *upcycling* são os mais benéficos ambientalmente, enquanto o *downcycling* se destaca economicamente. Comparado a outras fontes renováveis, a energia fotovoltaica tem maiores impactos ambientais se descartada em aterros, mas se torna competitiva com a reciclagem de materiais.

Os estudos revelaram que a reciclagem de painéis fotovoltaicos tem avançado significativamente, com diversas tecnologias emergindo para otimizar a recuperação de materiais e minimizar impactos ambientais. Métodos como a reciclagem mecânica, química e térmica demonstram rendimentos elevados, com recuperação de até 95% dos materiais, ao mesmo tempo em que reduzem substancialmente impactos como toxicidade e aquecimento global. Métodos de reciclagem inovadores, como o uso de CO₂ supercrítico e catalisadores específicos, mostram-se promissores na eficiência de recuperação de metais preciosos e na minimização de impactos ambientais. A reciclagem de painéis fotovoltaicos oferece benefícios ambientais significativos, como a preservação de recursos naturais e a redução de emissões tóxicas. A recuperação de metais valiosos, como a prata, cuja escassez se aproxima, é crucial para evitar o esgotamento das reservas e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

No contexto da economia circular, a reciclagem de painéis fotovoltaicos contribui significativamente para a redução da necessidade de extração de matérias-primas e diminui a pegada de carbono associada à produção de novos painéis. A adoção de práticas eficientes de coleta e reciclagem, como sugerido por diversos estudos, pode reintegrar materiais recuperados na produção, fortalecendo a sustentabilidade e a segurança energética. A gestão eficiente dos resíduos fotovoltaicos requer uma abordagem multifacetada que englobe incentivos

financeiros, responsabilidade do produtor, e tecnologias avançadas de reciclagem. A implementação de estratégias regionais e sustentáveis, como a otimização de centros de coleta e o uso de transportes de baixo impacto, é essencial para minimizar os riscos ambientais. O futuro da reciclagem fotovoltaica depende de políticas regulatórias sólidas e da participação ativa dos fabricantes no processo.

A revisão das legislações internacionais revela que, no entanto, entre os principais países com maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, apenas a União Europeia possui um enquadramento regulamentar específico para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, evidenciando a urgência de políticas similares em outras regiões. A lacuna regulatória, especialmente em países como China, Estados Unidos, Japão e Índia, ressalta a necessidade de desenvolver normas que incentivem práticas de economia circular e gestão adequada de resíduos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 01 fev. 2025.

ACHARYA, Aditya *et al.* Effective collection of end-of-life solar panels through an incentive-based model. **Solar Energy**, [S.L.], v. 268, p. 112215, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.112215>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23008496>. Acesso em: 23 fev. 2024.

ANSANELLI, G. *et al.* A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels. **Applied Energy**, [S.L.], v. 290, p. 116727, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921002440>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ANUSUYA, K. *et al.* From efficiency to eternity: a holistic review of photovoltaic panel degradation and end-of-life management. **Solar Energy**, [S.L.], v. 265, p. 112135, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.112135>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23007697>. Acesso em: 23 fev. 2024.

AZEUMO, Maurianne Flore *et al.* Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 193, p. 314-319, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024819300510>. Acesso em: 29 fev. 2024.

BARBOSA, Fabiano Timbó *et al.* Tutorial para execução de revisões sistemáticas e metanálises com estudos de intervenção em anestesia. **Brazilian Journal Of Anesthesiology**, [S.L.], v. 69, n. 3, p. 299-306, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjan.2018.11.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034709418301417?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2024.

BRENES, Giselle H. *et al.* Chemical method for ethyl vinyl acetate removal in crystalline silicon photovoltaic modules. **Solar Energy**, [S.L.], v. 263, p. 111778, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.055>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23003870>. Acesso em: 23 fev. 2024.

BRIAND, Axel *et al.* Versatility assessment of supercritical CO₂ delamination for photovoltaic modules with ethylene-vinyl acetate, polyolefin or ethylene methacrylic acid ionomer as encapsulating polymer. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 410, p. 137292, jul. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137292>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623014506>. Acesso em:
 23 fev. 2024.

BRIAND, Axel *et al.* Deformation-induced delamination of photovoltaic modules by foaming ethylene-vinyl acetate with supercritical CO₂. **Journal Of Co2 Utilization**, [S.L.], v. 59, p. 101933, maio 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101933>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221298202200052X>. Acesso em:
 29 fev. 2024.

CAPES. Diretoria de Avaliação. **DOCUMENTO TÉCNICO DO QUALIS PERIÓDICOS**. Brasília: Capes, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/avaliacao/avaliacao-quadrinial-2017/DocumentotcnicoQualisPeridicosfinal.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 07 fev. 2025.

CHEEMA, Humma Akram *et al.* Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. **Waste Management**, [S.L.], v. 174, p. 187-202, fev. 2024. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.025>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X23007146>. Acesso em:
 23 fev. 2024.

DIAS, Pablo R. *et al.* High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: technical, economic and environmental feasibility assessment. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 169, p. 112900, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112900>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122007821>. Acesso em:
 29 fev. 2024.

DIAS, Pablo *et al.* Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 165, p. 105241, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105241>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920305565>. Acesso em:
 29 fev. 2024.

DOMÍNGUEZ, Adriana *et al.* Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 133, p. 1188-1200, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.063>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310139>. Acesso em:
 29 fev. 2024.

FIANDRA, Valeria *et al.* End-of-life of silicon PV panels: a sustainable materials recovery process. **Waste Management**, [S.L.], v. 84, p. 91-101, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.035>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18307207>. Acesso em: 29 fev. 2024.

FTHENAKIS, Vasilis *et al.* Sustainability evaluation of CdTe PV: an update. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 123, p. 109776, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109776>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300721>. Acesso em: 29 fev. 2024.

GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 57-73, 15 set. 2019. Logeion Filosofia da Informacao. <http://dx.doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>. Disponível em: <https://revista.ibict.br/fiinf/article/view/4835/4187>. Acesso em: 30 maio 2024.

GALVÃO, Taís Freire *et al.* Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>. Disponível em: http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742014000100018. Acesso em: 31 ago. 2024.

HUBER, Sophie Theresia; STEININGER, Karl W.. Critical sustainability issues in the production of wind and solar electricity generation as well as storage facilities and possible solutions. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 339, p. 130720, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130720>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130720>. Acesso em: 14 mar. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy statistics 2024**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf. Acesso em: 01 fev. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **End-of-life management: solar photovoltaic panels**. Solar Photovoltaic Panels. 2016. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. Acesso em: 02 set. 2024.

KASTANAKI, Eleni *et al.* Energy decarbonisation in the European Union: assessment of photovoltaic waste recycling potential. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 192, p. 1-13, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.098>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122005663>. Acesso em: 29 fev. 2024.

KREBS-MOBERG, Miles *et al.* Third generation of photovoltaic panels: a life cycle assessment. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 164, p. 556-565, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120314798>. Acesso em: 29 fev. 2024.

LI, Jing *et al.* Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 196, p. 107027, set. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107027>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923001635>. Acesso em: 23 fev. 2024.

LIM, Mitchell Shyan Wei *et al.* Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 340, p. 130796, mar. 2022. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130796>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622004346>. Acesso em: 29 fev. 2024.

LIU, Bingchun *et al.* Recycling to alleviate the gap between supply and demand of raw materials in China's photovoltaic industry. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 201, p. 107324, fev. 2024. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107324>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923004585>. Acesso em: 23 fev. 2024.

LOVATO, Émilie Scheunemann *et al.* Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. **Journal Of Co2 Utilization**, [S.L.], v. 46, p. 101477, abr. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982021000445>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAANI, Thomas *et al.* Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 735, p. 138827, set. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720323445>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAHMOUDI, Sajjad *et al.* Multi-levels of photovoltaic waste management: a holistic framework. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 294, p. 126252, abr. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126252>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621004728>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAHMOUDI, Sajjad *et al.* Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: a comprehensive assessment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 260, p. 120996, jul. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120996>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262031043X>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAHMOUDI, Sajjad *et al.* End-of-life photovoltaic modules: a systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 146, p. 1-16, jul. 2019a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919301247>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAHMOUDI, Sajjad *et al.* Photovoltaic waste assessment: forecasting and screening of emerging waste in australia. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 146, p. 192-205, jul. 2019b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919301454>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAO, Dan *et al.* Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: a case study of crystalline silicon photovoltaic panels. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 434, p. 140320, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623044785>. Acesso em: 23 fev. 2024.

MYYAS, Ra'Ed Nahar *et al.* A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. **Solar Energy**, [S.L.], v. 237, p. 19-28, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>. Acesso em: 14 mar. 2024.

NAIN, Preeti *et al.* Understanding the possibility of material release from end-of-life solar modules: a study based on literature review and survey analysis. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 160, p. 903-918, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120311101>. Acesso em: 29 fev. 2024.

NEVALA, Sanna-Mari *et al.* Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. **Waste Management**, [S.L.], v. 87, p. 43-50, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19300534>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ONS. **Resultados da operação**. 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/registros.aspx>. Acesso em: 06 fev. 2025.

OTENG, Daniel *et al.* An evaluation of the impact framework for product stewardship on end-of-life solar photovoltaic modules: an environmental lifecycle assessment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 411, p. 137357, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137357>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623015159>. Acesso em: 23 fev. 2024.

PANG, Sheng *et al.* Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 230, p. 111213, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111213>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821002567>. Acesso em: 29 fev. 2024.

POULEK, Vladislav *et al.* On site renovation of degraded PV panels – Cost and environmental effective technology. **Solar Energy**, [S.L.], v. 263, p. 111956, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.111956>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111956>. Acesso em: 14 mar. 2024.

PRASAD, D.s. *et al.* A novel approach for the efficient recovery of lead from End-of-Life Silicon Photovoltaic modules. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 266, p. 112672, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112672>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024823004932>. Acesso em: 23 fev. 2024.

PRASAD, D.s. *et al.* Process optimization studies of essential parameters in the organic solvent method for the recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 245, p. 111850, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111850>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822002707>. Acesso em: 29 fev. 2024.

PROTOPAPA, M.L. *et al.* Optical methods to identify end-of-life PV panel structure. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 171, p. 105634, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105634>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921002433>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ROSSI, Federico *et al.* Comparative scenario-based LCA of renewable energy technologies focused on the end-of-life evaluation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 405, p. 136931, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136931>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623010892>. Acesso em: 23 fev. 2024.

SAH, Dheeraj *et al.* Growth and analysis of polycrystalline silicon ingots using recycled silicon from waste solar module. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 261, p. 112524, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112524>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024823003458>. Acesso em: 23 fev. 2024.

SALIM, Hengky 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**, [S.L.], v. 211, p. 537-554, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618336321>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SANTOYO-CASTELAZO, E. *et al.* Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: a case study for Mexico. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 316, p. 128314, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128314>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621025294>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SILVA, Beatriz Lorrane Farias *et al.* Dimensionamento e viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. **Revista Produção Online**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 863-890, 20 set. 2021. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO. <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4342>. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/4342>. Acesso em: 05 ago. 2023.

TAN, Verity *et al.* Solar photovoltaic waste and resource potential projections in Australia, 2022–2050. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 202, p. 107316, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107316>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107316>. Acesso em: 03 fev. 2024.

TAO, M. *et al.* Commentary on Technoeconomic Analysis of High-Value, Crystalline Silicon Photovoltaic Module Recycling. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 239, p. 111677, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111677>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822000988#section-cited-by>. Acesso em: 29 fev. 2024.

THOMASSEN, Gwenny *et al.* Prospective material and substance flow analysis of the end-of-life phase of crystalline silicon-based PV modules. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 176, p. 105917, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105917>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921005267>. Acesso em: 29 fev. 2024.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva nº 2012/19/UE, de 2012. **Jornal Oficial da União Europeia**. Estrasburgo, 04 jul. 2012. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>. Acesso em: 04 set. 2024.

VINAYAGAMOORTHY, R. *et al.* Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 111715, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723024545>. Acesso em: 23 fev. 2024.

WANG, Xiaopu *et al.* A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 248, p. 111976, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822003932>. Acesso em: 29 fev. 2024.

WU, Zhipeng *et al.* A novel method for layer separation in waste crystalline silicon PV modules via combined low-temperature and thermal treatment. **Waste Management**, [S.L.], v. 172, p. 299-307, dez. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.036>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X23006475>. Acesso em: 23 fev. 2024.

YASHAS, Shivamurthy Ravindra *et al.* Catalytic recovery of metals from end-of-life polycrystalline silicon photovoltaic cells: experimental insights into silver recovery.

Waste Management, [S.L.], v. 171, p. 184-194, nov. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.038>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X23005548>. Acesso em: 23 fev. 2024.

YU, Haofan *et al.* Producer vs. local government: the locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in zhejiang province. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 169, p. 105484, jun. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105484>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921000914>. Acesso em: 29 fev. 2024.

CAPÍTULO II – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL NA PRODUÇÃO E USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UMA ABORDAGEM DE ACV

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo identificar o impacto ambiental associado ao Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos (PAG100) de painéis fotovoltaicos no Brasil. Foi realizado estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) considerando a perspectiva *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo). Todos os indicadores do estudo, foram baseados em uma unidade funcional de 1 m² do painel fotovoltaico TSM-405DE15M(II) da fabricante chinesa Trinasolar. A avaliação do impacto foi realizada pelo método IPCC 2021 AR6, para categorizar o impacto ambiental do PAG100. Os resultados indicaram um impacto de 395 kgCO₂-eq. em termos de PAG100. Deste total, cerca de 82% provêm da etapa de fabricação do painel. A reciclagem é responsável por aproximadamente 16%, enquanto as etapas de transporte, da fábrica até o local de instalação, e manutenção contribuem com cerca de 1% cada. Adicionalmente foi realizada comparação entre o PAG100 associado à mesma quantidade de energia gerada por 1 m² do módulo estudado e pela matriz elétrica brasileira, sendo que a energia proveniente do módulo fotovoltaico apresentou um PAG100 aproximadamente 46% inferior ao da matriz elétrica brasileira, reforçando a relevância ambiental da tecnologia fotovoltaica em relação às fontes convencionais.

Palavras-chave: transição energética; energias renováveis; sustentabilidade ambiental.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética é indispensável para a obtenção do desenvolvimento sustentável. Essa premissa está presente na sétima meta dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Jr; Reis, 2016; ONU, 2024). Uma das formas de viabilizar essa transição é através da descarbonização dos sistemas de energia, responsáveis por três quartos da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Ungaretti *et al.*, 2025). Dentre as fontes de energia renovável e limpa com grande potencial de contribuir para essa transição está a energia solar (Bicalho *et al.*, 2018).

Conforme Silva *et al.* (2021), a adoção de um Sistema Fotovoltaico (SFV) traz contribuições positivas ao considerar diversos aspectos sustentáveis: i) ambientalmente, o SFV oferece benefícios significativos, uma vez que não emite poluentes nem produz ruídos durante a geração de energia, sendo assim uma fonte limpa e renovável; ii) do ponto de vista social, essa fonte de energia pode ser aplicada em regiões remotas onde outras fontes convencionais não têm alcance, melhorando o acesso à eletricidade em áreas isoladas; e, iii) economicamente, os custos de implementação têm diminuído ao longo dos anos devido ao avanço tecnológico, tornando o SFV uma opção mais acessível e economicamente viável.

Vian (2021) entende que ao longo das últimas décadas, a tecnologia fotovoltaica apresentou um notável desenvolvimento, permitindo a ampliação da capacidade instalada e da utilização dessa energia. Esse avanço foi impulsionado por diversos fatores, tais como a ampliação da demanda por energia, o crescente reconhecimento da importância das fontes renováveis e limpas de energia, a instabilidade nos preços dos combustíveis fósseis conjugado com o aumento do custo da energia convencional e a confiabilidade que a energia solar oferece. Para Reis (2017), podem ainda ser considerados a diminuição dos custos de instalação dos painéis, os consideráveis avanços na eficiência das células e os incentivos recentes à geração distribuída.

Em virtude dessas melhorias, a utilização de energia fotovoltaica vem apresentando rápido crescimento em todo mundo, sendo que em 2022, cerca de 16,7% da produção de energia elétrica renovável, foi gerada por sistemas fotovoltaicos (International Renewable Energy Agency, 2024). A União Europeia tem liderado a adoção da tecnologia fotovoltaica desde a década de 1990, tendo a China

como principal produtor e exportador mundial. No Brasil, a capacidade instalada de energia fotovoltaica e sua participação na matriz energética apresentou crescimento exponencial na última década. Segundo dados da Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica (2025), a energia fotovoltaica se tornou a segunda fonte de energia com maior participação na matriz elétrica brasileira em janeiro de 2025, com 21,4%, atrás apenas na energia hídrica, com 45,1%.

Embora a importância dos SFV nas áreas energética, social e ambiental seja indiscutível, Rossi *et al.* (2023) salienta que, assim como todas tecnologias de energias renováveis, os painéis fotovoltaicos são responsáveis por alguma emissão de GEE ao longo do seu ciclo de vida e esta emissão não é a única preocupação ambiental atribuída à estas tecnologias, devendo o consumo de recursos, a ocupação da terra, o transporte dos módulos até seu destino e as emissões de vários tipos de poluentes serem considerados. Além destes impactos, deve-se considerar a destinação futura dos módulos fotovoltaicos. Considerando que a vida útil de um painel fotovoltaico varie entre 25 e 30 anos, é previsto um aumento significativo no número de painéis que chegarão ao final de sua vida útil nos próximos anos (Vinayagamoorthi *et al.*, 2024).

Dado os efeitos negativos (e efeito rebote) das tecnologias ambientais, teóricos da área de economia ecológica apontam que o fenômeno de desacoplamento (decoupling) não é suficiente para a transição energética, isto é, embora a sociedade venha adotando tecnologias mais limpas e mais eficientes do ponto de vista ambiental (menos poluição), o ritmo de crescimento das economias supera a taxa de redução da poluição e a própria produção dessas tecnologias gera efeitos negativos sobre o meio ambiente (Veiga, 2023).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal identificar o impacto ambiental associado ao Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos (PAG100) associado a 1 m² de painel fotovoltaico no Brasil. Mais especificamente, o estudo pretende responder as seguintes questões: i) qual o Potencial de Aquecimento Global (PAG) que painéis fotovoltaicos podem gerar ao longo de sua vida útil considerando uma perspectiva *cradle-to-grave* (berço ao túmulo) e, ii) quais etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos apresentam os maiores impactos ambientais?

Para atender ao objetivo, o presente trabalho realizou estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) considerando a perspectiva *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo), que contempla a análise de informações de todo o ciclo de vida do produto/processo, considerando fluxos de entrada e saída, como energia, materiais, resíduos e emissões, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. Todos os indicadores do estudo, foram baseados em uma unidade funcional de 1 m² do painel fotovoltaico TSM-405DE15M(II) da fabricante chinesa Trinasolar. A avaliação do impacto foi realizada pelo método IPCC 2021 AR6²⁰ para categorizar o impacto ambiental do Potencial de Aquecimento Global de um período de 100 anos (PAG100).

A principal contribuição deste trabalho reside na realização de um estudo que é inédito para os parâmetros adotados, incluindo o modelo do painel fotovoltaico e os parâmetros de geração de energia. Além disso, o estudo complementa essa contribuição ao comparar o impacto ambiental PAG100 da geração de energia elétrica de 1 m² do módulo em análise com o da matriz elétrica brasileira.

Conforme Dias *et al.* (2022), é esperado um aumento de 11 vezes da energia fotovoltaica global instalada nos próximos 30 anos. Ao passo que temos a natureza ainda incipiente de políticas governamentais sobre a gestão de sistemas fotovoltaicos no fim de vida (Salim *et al.*, 2019), a realização de uma ACV torna-se indispensável para entender profundamente os impactos ambientais associados a cada etapa do ciclo de vida dos painéis.

O artigo divide-se em quatro seções além dessa introdução. A próxima seção apresenta um breve referencial teórico acerca da ACV e trabalhos aplicados em sistemas fotovoltaicos. A terceira seção demonstra a metodologia empregada e a quarta apresenta e discute os resultados. A última seção é reservada para algumas considerações finais.

20 Refere-se ao Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). É utilizado na análise do impacto ambiental, especialmente no cálculo do Potencial de Aquecimento Global.

2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

O desempenho ambiental de produtos, tanto in natura quanto processados, tem sido objeto de atenção contínua por parte de *stakeholders*, como empresas produtoras, consumidores e governos, cada qual com seus interesses particulares (Claudino *et al.*, 2013) (Dias *et al.*, 2020) (Queiroz *et al.*, 2022).

Conforme Krebs-Moberg *et al.*, (2021), uma das metodologias de análise de desempenho ambiental é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), um mecanismo utilizado para avaliar os impactos ecológicos de um produto ou processo. A ACV é uma metodologia analítica usada para avaliar qualquer produto ou processo sob uma perspectiva ambiental, que se baseia na coleta e análise de informações de todo o ciclo de vida do produto/processo, considerando fluxos de entrada e saída, como energia, materiais, resíduos e emissões (Dias *et al.*, 2022).

Podem ser citadas como aplicações da ACV o desenvolvimento de produtos, passando pela rotulagem ecológica e regulação, até a definição de cenários de prioridade e de política ambiental (Wahrlich *et al.*, 2020). A ACV também é comumente utilizada na avaliação e no aprimoramento de sistemas de produção, pois mapeia os principais e potenciais impactos ambientais (Dutra *et al.*, 2019).

Historicizando a ACV, Mao *et al.* (2024) relata que ela surgiu como uma ferramenta de gestão ambiental na década de 1960, quando a *Coca-Cola Company* contratou o *Midwest Resources Institute* para avaliar os impactos ambientais das garrafas de embalagens de bebidas, e em 1990, a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* apresentou um esboço preliminar da ACV. Posteriormente, a Organização Internacional para Padronização (ISO) desenvolveu as normas n.º 14040, que descreve os princípios e a estrutura, e a n.º 14044, que especifica requisitos e fornece diretrizes para análise do ciclo de vida.

Mao *et al.* (2024) defende que os softwares comerciais de ACV são fundamentais para o desenvolvimento da análise, embora variem em bases de dados²¹, funcionalidades, interface e princípios de modelagem, com ferramentas como GaBi, SimaPro, *eBalance* e *OpenLCA* sendo amplamente utilizadas.

21 Repositório estruturado que contém dados quantitativos sobre os fluxos de materiais, energia e emissões associados a diferentes processos, produtos ou serviços ao longo de seu ciclo de vida.

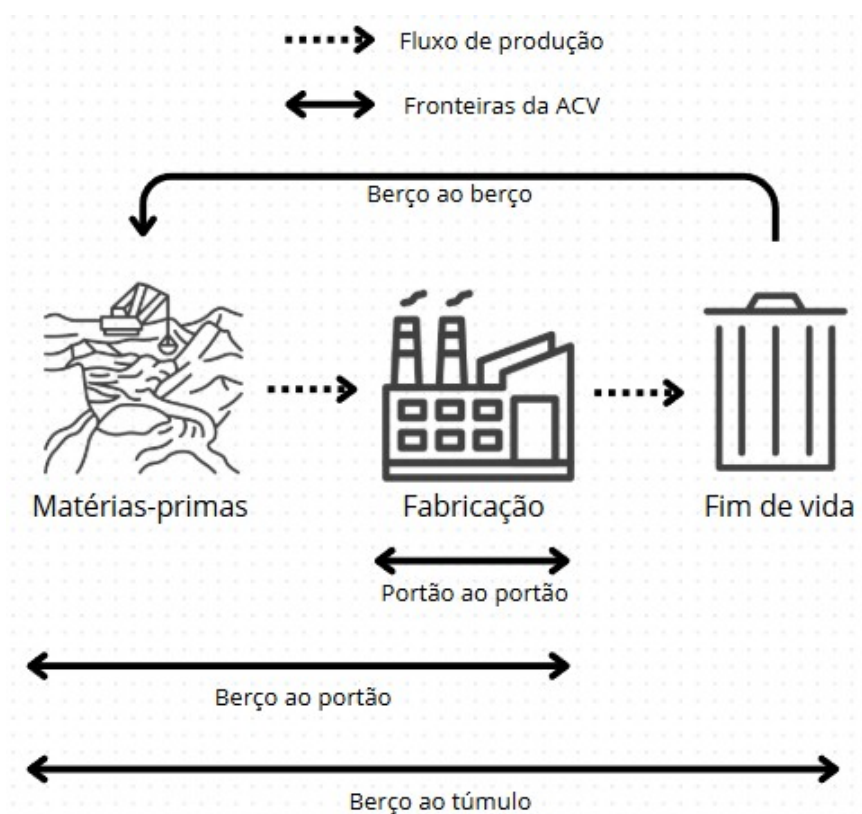
2.1 FASES DA ACV

A norma ABNT NBR ISO 14044:2009 traz que um estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009b).

Na primeira fase ocorre a definição das fronteiras da análise, que delimitam quais fases do ciclo de vida, de um produto ou processo, serão analisadas. Ainda segundo ABNT (2009b), a abrangência, incluindo os limites do sistema e o nível de detalhamento de uma ACV, depende do tema e do uso pretendido do estudo.

Conforme diferentes objetivos de avaliação, Mao *et al.* (2024) categoriza as fronteiras da ACV (primeira fase) em quatro tipos e as define (Figura 1).

Figura 1 – Fronteiras de uma ACV



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O modelo *cradle-to-gate* (do berço ao portão) abrange desde a extração de matérias-primas até o portão da fábrica, sem incluir a fase de descarte. Já o modelo *cradle-to-cradle* (do berço ao berço) incorpora a reciclagem e reutilização de

resíduos, o que se torna cada vez mais relevante à medida que a escassez de recursos se intensifica. O modelo *gate-to-gate* (do portão ao portão) cobre todas as etapas a partir da fabricação do produto, incluindo todos os recursos energéticos e materiais necessários. Por fim, o modelo *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo) contempla desde a extração de matérias-primas até o descarte final, abordando o ciclo de vida completo e considerando as entradas e saídas de cada etapa do processo.

A segunda fase, de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), reúne os dados de entrada e saída relacionados ao sistema em análise, isto é, abrange a identificação de todos os insumos (e respectivas quantidades) necessários para a produção de bem ou serviço. Essa etapa abrange a coleta das informações necessárias para atingir os objetivos do estudo (ABNT, 2009b).

Seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR ISO 14040:2009, a fase de avaliação de impacto da ACV (terceira fase) busca analisar a significância dos impactos ambientais potenciais, relacionando os dados do inventário com categorias e indicadores de impacto, e fornecendo informações para a interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009a). Como exemplos de categorias de impacto pode-se citar Potencial de Acidificação, de Eutrofização, de Aquecimento Global, entre outros.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do processo de ACV, onde os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e/ou da Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) são resumidos e avaliados. Essa fase serve de base para conclusões, recomendações e tomadas de decisão, em consonância com os objetivos e o escopo previamente definidos (ABNT, 2009b).

2.2 ACV DE PAINEL FOTOVOLTAICO

Um produto que vem tendo crescente demanda global é o painel fotovoltaico pois, conforme Dias *et al.* (2022), é esperado um aumento de 11 vezes da energia fotovoltaica global instalada nos próximos 30 anos. Ao passo que temos a natureza ainda incipiente de políticas governamentais sobre a gestão de sistemas fotovoltaicos no fim de vida (Salim *et al.*, 2019), a realização de uma ACV torna-se indispensável para entender profundamente os impactos ambientais associados a cada etapa do ciclo de vida dos painéis.

Segundo Rossi *et al.* (2023), assim como ocorre com outras tecnologias de energia renovável, os painéis fotovoltaicos também geram emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, essa não é a única questão ambiental associada a essas tecnologias, pois é necessário levar em conta o consumo de recursos, a ocupação do solo e as emissões de diferentes tipos de poluentes.

Santoyo-Castelazo *et al.* (2021) defende que, para incentivar e aumentar o desenvolvimento de tecnologias de energia solar, ainda são necessários estudos de sustentabilidade ambiental para avaliar os impactos reais causados, seja do ponto de vista do berço ao portão ou do berço ao túmulo.

3 METODOLOGIA

A metodologia da Análise de Ciclo de Vida (ACV) deste trabalho segue as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO 14044:2009, contemplando quatro fases interdependentes: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009b).

Todos os indicadores do estudo, como uso de energia e impacto ambiental, foram baseados em uma unidade funcional de 1 m² do painel fotovoltaico em estudo, o que abre a possibilidade de realizar uma comparação com alguns outros resultados de ACV de painéis fotovoltaicos, como por exemplo Gaidajis e Angelakoglou (2012), Carnevale *et al.* (2014), Yue *et al.* (2014) e Ritzen *et al.* (2019).

3.1 DESCRIÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico em estudo é do modelo TSM-405DE15M(II) da fabricante Trinasolar, fabricado na China. Como características elétricas, apresenta potência de pico de 405 W, eficiência energética de 20,20%, garantia de desempenho linear de 25 anos, estimando-se que, entre o 2º e o 25º ano de operação, o declínio médio anual da geração de energia não ultrapasse 0,60%, chegando a um mínimo de 83,10% da potência inicial aos 25 anos (Trina Solar, 2020).

Como características construtivas, é composto por 144 células de silício (Si) monocristalinas do tipo *half-cut*²², possui dimensões de 2015 x 996 x 35 mm, peso de 22 kg, vidro de 3,2 mm, material encapsulante EVA e quadro de liga de alumínio anodizado de 35 mm (Trina Solar, 2020).

3.2 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo e escopo de uma ACV devem ser claramente definidos e devem ser consistentes com a aplicação pretendida. Devido à natureza iterativa da ACV, o escopo pode ter que ser ajustado durante o estudo (ABNT, 2009b).

O objetivo deste estudo é apresentar, através de uma ACV, o impacto ambiental Potencial de Aquecimento Global no horizonte de 100 anos (PAG100)

²² Células solares cortadas ao meio, reduzindo perdas elétricas e melhorando eficiência e resistência a sombreamentos.

associado a 1 m² do painel fotovoltaico empregado na usina fotovoltaica do Campus Erechim da Universidade Federal da Fronteira Sul. Com este objetivo em mente, incentivar e aumentar o desenvolvimento de tecnologias de energia solar. Ressalta-se que a avaliação de impactos sociais e econômicos não é objetivo deste estudo.

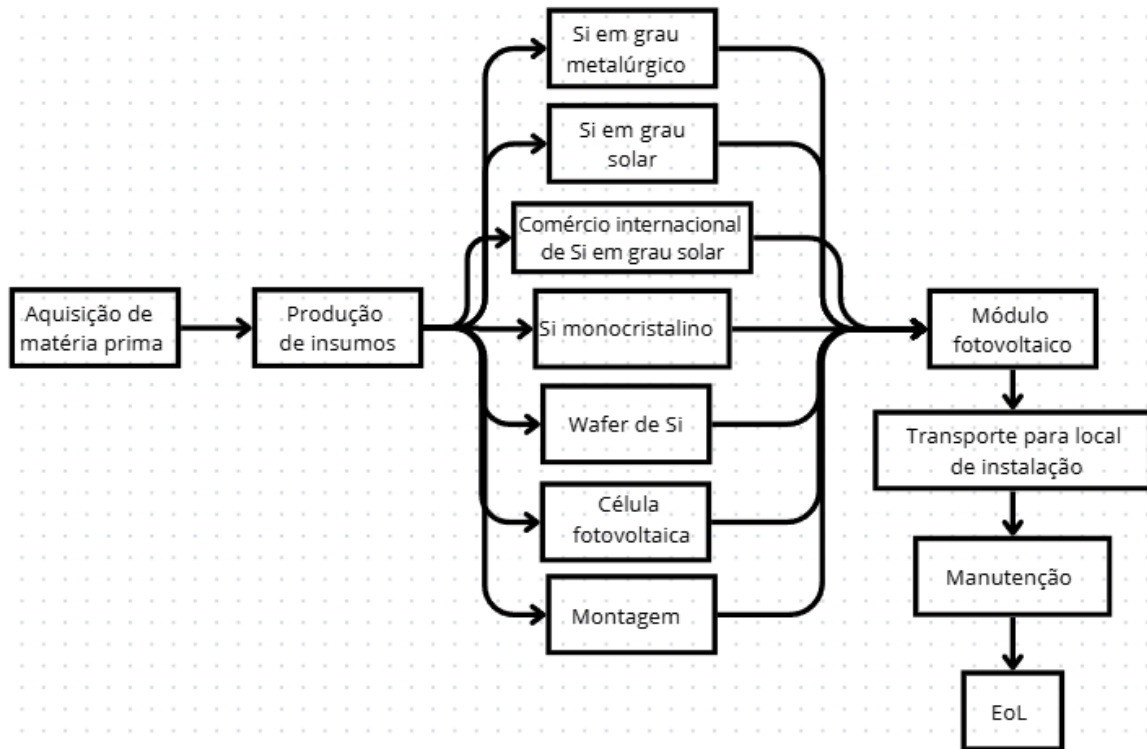
Os limites do sistema para o presente estudo de ACV foram definidos sob uma perspectiva “do berço ao túmulo”, que considera desde o processo de extração de matéria-prima até o estágio de fim de vida (EoL²³). Com esta perspectiva de ACV, quatro estágios foram considerados para a realização da ACV: (i) Fabricação; (ii) Transporte; (iii) Manutenção; e (iv) EoL.

A Figura 2 mostra os limites do sistema examinado e descreve os fluxos de materiais e processos envolvidos desde a aquisição de matéria-prima até o estágio de fim de vida (EoL). A seguir, são detalhados os quatro estágios considerados:

- i. Fabricação: o ciclo inicia com a aquisição de matéria-prima, que alimenta a produção de insumos. Dentro do estágio de produção de insumos, diversos passos são representados, como: produção de silício (Si) de grau metalúrgico, conversão para silício de grau solar, participação do comércio internacional de silício de grau solar, contemplando a importação/exportação desse material, produção de silício monocristalino e posterior transformação em *wafers* de Si, montagem de células fotovoltaicas e, finalmente, do módulo fotovoltaico.
- ii. Transporte: após a fabricação, ocorre o transporte do módulo fotovoltaico para o local de instalação, essencial para incluir os impactos logísticos no ciclo de vida.
- iii. Manutenção: este estágio considera as atividades necessárias para garantir o desempenho do módulo fotovoltaico durante sua vida útil.
- iv. EoL (Fim de Vida): após a fase operacional, o sistema aborda o estágio final de vida do módulo, envolvendo o transporte até um centro de reciclagem para desmantelamento e processo de reciclagem.

23 Do inglês End-of-Life.

Figura 2 – Escopo do ciclo de vida do avaliado



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Um objetivo adicional deste estudo é comparar o PAG100 da geração de energia elétrica de 1 m² deste painel, ao longo de seu ciclo de vida, com o da mesma quantidade de energia fornecida pela matriz elétrica brasileira.

3.3 ANÁLISE DE INVENTÁRIO

O inventário de ciclo de vida do estágio da fabricação foi criado com base no proposto por Frischknecht *et al.* (2020) para um painel fotovoltaico monocristalino fabricado na China.

O inventário do estágio de transporte foi elaborado pelo autor considerando as seguintes etapas:

- Transporte terrestre: do local de fabricação em Changzhou até o porto de origem em Shanghai, totalizando 189 km.
- Transporte marítimo: do porto de Shanghai (origem) ao porto de Itajaí (destino), percorrendo 24.357,504 km.
- Transporte terrestre: do porto de Itajaí até o local de instalação em Erechim, com um percurso de 466 km.

Para o estágio de manutenção, foi adotada uma adaptação da abordagem proposta por Gaidajis e Angelakoglou (2012), considerando os seguintes aspectos:

- a) Frequência: manutenções realizadas duas vezes ao ano, ao longo de 25 anos.
- b) Deslocamento da equipe técnica: 30 km por manutenção.
- c) Insumos: 1 tonelada por manutenção.
- d) Consumo de água: 5 litros por metro quadrado a cada manutenção.

Por fim, para o estágio de fim de vida, assumiu-se que o módulo seja levado a um centro de reciclagem localizado na cidade de Valinhos, no estado de São Paulo, e os consumos de energia para a desmontagem e reciclagem foram os propostos em Carnevale *et al.* (2014).

Para cada processo do inventário do ciclo de vida foram adotadas, de forma combinada, as bases de dados disponíveis de forma gratuita no repositório online para dados de ACV *openLCA Nexus*, por exemplo ELCD²⁴. Os conjuntos de dados do Nexus, ligeiramente harmonizados para superar diferenças metodológicas, podem ser importados para o software de ACV e utilizados combinadamente em um banco de dados ou de forma independente, devido à sua base comum de fluxos elementares e dados de referência (Greendelta, 2024).

Os processos indisponíveis nas bases de dados ou considerados inadequados para uso tiveram seus inventários desenvolvidos com base em informações obtidas na internet, abrangendo estudos científicos, sites especializados em ACV e bancos de dados renomados na área de análise de ciclo de vida. Entre as fontes utilizadas destacam-se relatórios da Agência Internacional de Energia (AIE), o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros (SICV Brasil) e o Ecoinvent, uma das bases de dados mais completas para análise de ciclo de vida (Ecoinvent, 2025; International Energy Agency, 2025; SICV Brasil, 2025). No total, foram elaborados 28 inventários de processos para a realização desta ACV.

24 Base de dados desenvolvida pela Comissão Europeia.

3.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO

Para a tarefa de avaliação do impacto, o conhecido método de análise de impacto IPCC 2021 AR6 foi usado para categorizar o impacto ambiental PAG100. Destaca-se que a primeira simulação da ACV foi conduzida com base no também conhecido método de análise de impacto CML 2001²⁵, resultando em um PAG100 substancialmente inferior aos reportados em estudos similares que empregaram a abordagem *cradle-to-grave* e a unidade funcional de 1 m². Esta discrepância sugere uma possível inadequação do método CML 2001 para a análise da categoria de impacto PAG100.

Segundo Ferrández-García *et al.* (2016), dentro do contexto da ACV, o Potencial de Aquecimento Global (PAG) é um dos indicadores mais utilizados para mensurar possíveis danos ambientais. Tal ideia é corroborada por Santoyo-Castelazo *et al.* (2021), onde a avaliação do PAG é predominante em estudos de ACV de painéis fotovoltaicos.

O PAG mede a quantidade de radiação térmica infravermelha que um gás de efeito estufa, por exemplo dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) é capaz de absorver ao ser liberado na atmosfera durante um determinado período. É caracterizado pelo Potencial de Aquecimento Global de cada kg de gás de efeito estufa em seu equivalente de CO₂ (kg CO₂-eq.).

Os intervalos mais comuns são 20, 100 e 500 anos, e a diferença entre eles está relacionada à persistência dos gases na atmosfera e ao seu impacto relativo ao CO₂. Quanto à persistência na atmosfera, os gases de podem ser divididos em gases de vida curta (como CH₄) e de vida longa (como CO₂ e N₂O).

Gases de vida curta, no horizonte de 20 anos, possuem um alto impacto, já que são potentes no curto prazo, apesar de sua rápida degradação na atmosfera; em 100 anos, o impacto é menor, pois boa parte do gás já se dissipou; em 500 anos, o efeito praticamente desaparece.

Já os gases de vida longa têm um impacto constante, permanecendo relevante em todos os horizontes temporais. Para horizontes de 500 anos, o CO₂ e o

²⁵ Desenvolvido pela Universidade de Leiden.

N₂O são dominantes, pois continuam a contribuir para o aquecimento global mesmo após séculos.

Conforme o IPCC (2014), o PAG foi apresentado no Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC para ilustrar as dificuldades de comparar componentes com diferentes propriedades físicas usando uma métrica única, sendo que o PAG para um horizonte de 100 anos (PAG100) foi adotado pela *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) e pelo Protocolo de Kyoto, tornando-se amplamente utilizado como métrica padrão, embora seja apenas uma entre várias métricas e horizontes de tempo possíveis.

As simulações para quantificação do impacto PAG100 foram conduzidas no software *OpenLCA*, uma ferramenta gratuita especializada em ACV. Esta ferramenta foi utilizada em estudos anteriores, como evidenciado pelos trabalhos de Chung *et al.* (2021), Dias *et al.* (2021), Ganesan *et al.* (2022) e Jiang *et al.* (2024), os quais demonstraram sua adequação para o uso pretendido.

3.5 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A interpretação do ciclo de vida é apresentada nos tópicos resultados e discussão dos resultados.

3.6 COMPARAÇÃO DO PAG100 NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

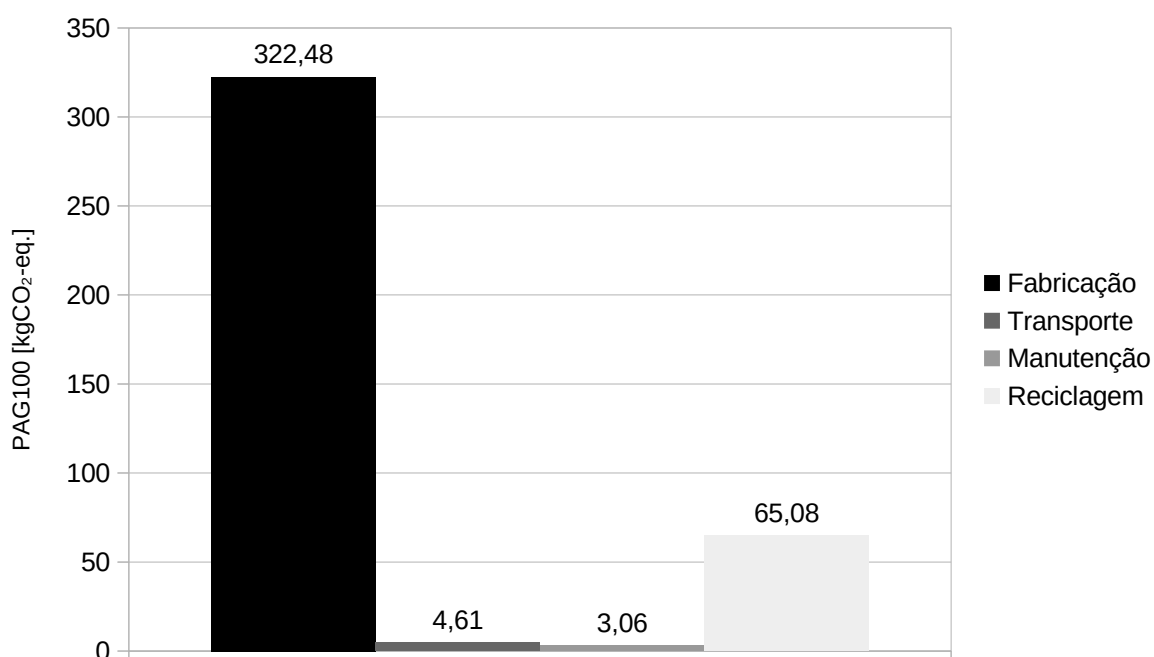
Para realizar a comparação entre o PAG100 da geração de energia elétrica de 1 m² do módulo em estudo com o da matriz elétrica brasileira, primeiramente foi estimada a geração de energia elétrica do módulo durante 25 anos. A este valor foi multiplicado o fator de emissão de GEE da matriz elétrica brasileira (dado em kgCO₂-eq./kWh), resultando em um valor de PAG100 para ela.

O fator de emissão é um coeficiente que quantifica as emissões ou remoções de um gás por unidade de atividade, geralmente calculado a partir de amostras de dados para representar emissões em um nível de atividade específico sob condições operacionais definidas (Mfumu, 2021).

4 RESULTADOS

A análise do ciclo de vida, sob a perspectiva *cradle-to-grave*, de 1 m² do painel fotovoltaico empregado na usina fotovoltaica do Campus Erechim da UFFS aponta um Potencial de Aquecimento Global para um horizonte de 100 anos (PAG100) de aproximadamente 395 kgCO₂-eq. Deste total, cerca de 82% provêm da etapa de fabricação do painel. A reciclagem é responsável por aproximadamente 16%, enquanto as etapas de transporte, da fábrica até o local de instalação, e manutenção contribuem com cerca de 1% cada (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Contribuições etapas



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A mesma quantidade de energia elétrica de 1 m² do módulo em estudo, ao longo de sua vida útil, proveniente da matriz elétrica brasileira, resulta em um PAG100 de cerca de 736,34 kgCO₂-eq.

4.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O PAG100 do ciclo de vida analisado é majoritariamente influenciado pelas emissões de dióxido de carbono para o ar, que correspondem a ~93% deste impacto e, em menor escala, por emissões de metano, óxido nitroso, entre outras.

Em linha com outros trabalhos sobre ACV de módulos fotovoltaicos, por exemplo Santoyo-Castelazo *et al.* (2021) e Gaidajis e Angelakoglou (2012), a etapa de fabricação de painel fotovoltaico se destaca como maior contribuinte da categoria de impacto ambiental analisada.

Assim, uma análise aprofundada desta etapa foi conduzida para identificar os principais contribuintes do PAG100 relacionados a ela. Para isto, esta etapa foi dividida em sete subetapas, conforme o inventário de ciclo de vida que serve como base para este estudo (Frischknecht *et al.*, 2020). São elas: produção de silício (Si) em grau metalúrgico; produção de Si em grau solar; mercado global de Si em grau solar; produção de Si monocristalino; produção de *wafer* de Si monocristalino; produção de célula fotovoltaica monocristalina; e, por fim, montagem de painel fotovoltaico de Si monocristalino.

As contribuições de PAG100 aproximadas das diferentes subetapas da etapa de fabricação são: 58,75% para a montagem do painel fotovoltaico, 20,75% para o silício monocristalino, 7,25% para a célula fotovoltaica, 5,50% para o silício em grau solar, 4,75% para o comércio global de Si em grau solar, 2,50% para o *wafer* e 0,50% para o silício metalúrgico, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Contribuições PAG100 da etapa de fabricação

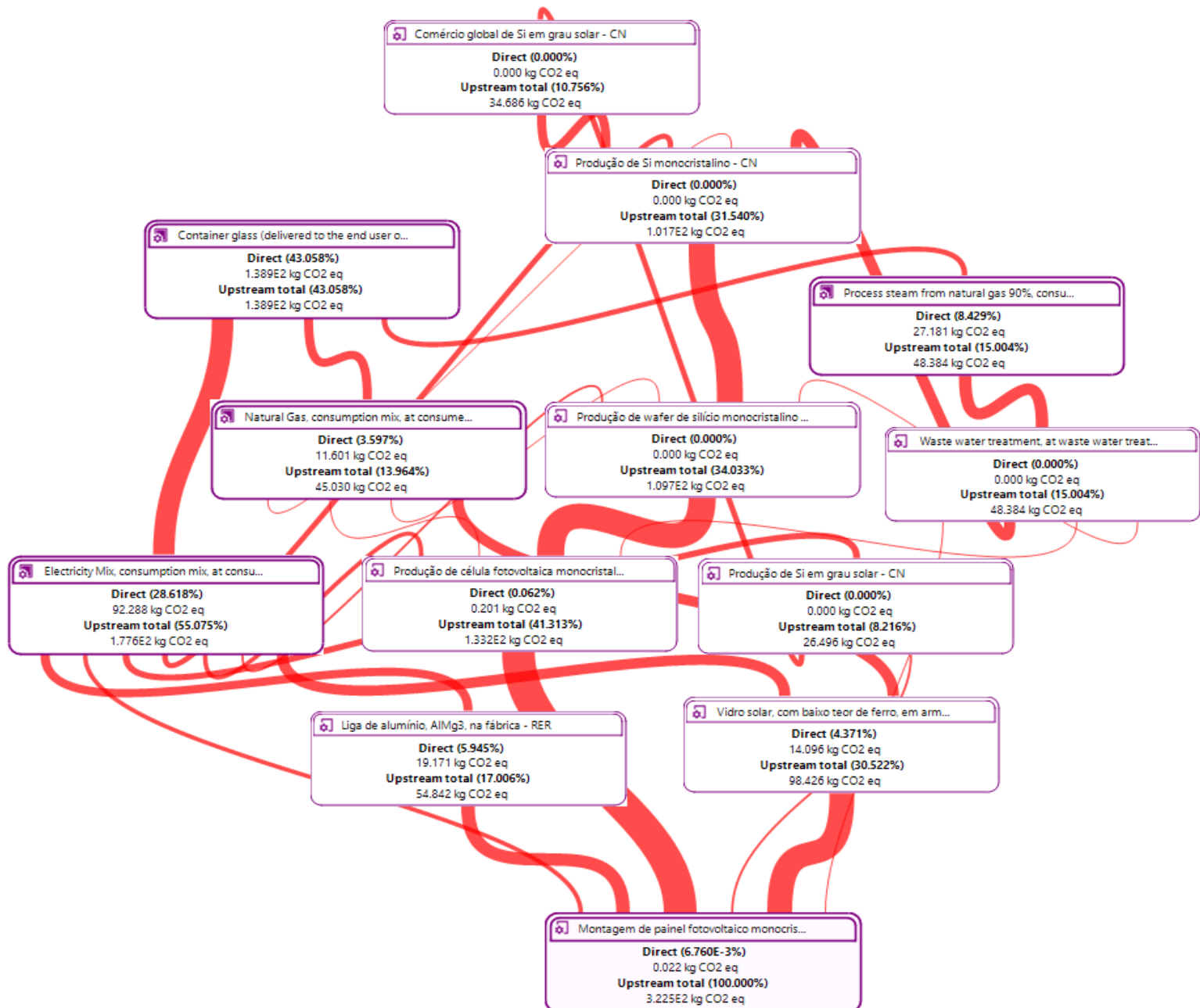
Categoria de impacto ambiental	Acrônimo	Unidade	Subetapas da fabricação							Total
			Si em grau metalúrgico	Si em grau solar	Comércio global de Si em grau solar	Si monocristalino	Wafer de Si	Célula fotovoltaica	Montagem de 1 m ² de painel	
Potencial de Aquecimento Global – 100 anos	PAG100	Kg CO ₂ -eq.	1,90E+00	1,77E+01	1,51E+01	6,70E+01	8,03E+00	2,35E+01	1,89E+02	3,22E+02

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Uma representação gráfica que ilustra o fluxo de recursos, energia e materiais dentro da etapa de fabricação, é mostrado na Figura 3, através de um diagrama de Sankey. A espessura das linhas indicam a magnitude de cada fluxo entre os processos. No diagrama fornecido foram considerados apenas os processos que têm uma contribuição mínima de 5% para o impacto ambiental total, devido à limitação do tamanho da página. O termo *upstream* refere-se às contribuições de processos anteriores na cadeia produtiva.

O processo "*Container glass*" aparece com a maior contribuição direta no diagrama, e sua presença pode ser explicada como uma alocação genérica de resíduos, devido à limitações do banco de dados ELCD. gerados em processos de energia, como na produção de eletricidade, gás natural e vapor.

Figura 3 – Diagrama de Sankey da etapa de fabricação



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na comparação do potencial de aquecimento global da geração de energia elétrica de 1 m² deste módulo, ao longo de sua vida útil, com o da mesma quantidade de energia fornecida pela matriz elétrica brasileira, a geração de energia elétrica é calculada conforme Fthenakis *et al.* (2008) pela Equação 1, onde G indica

a geração de energia elétrica, E a eficiência de conversão do módulo, I a insolação solar média diária, PR o índice de desempenho²⁶, e L o tempo de vida útil:

$$G = E \times I \times PR \times L \quad (1)$$

Foram considerados os seguintes parâmetros: eficiência de conversão do módulo (E) de 20,2%, conforme especificado pelo fabricante (Trina Solar, 2020); insolação solar média diária (I) de 4,82 kWh/m²/dia, equivalente a 1.759,3 kWh/m²/ano para a região de Erechim (Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio Brito, 2024); índice de desempenho (PR) de 83,21%, obtido a partir de simulação do projeto da usina fotovoltaica; e tempo de vida útil (L) de 25 anos, conforme indicado pelo fabricante (Trina Solar, 2020). Baseando-se nesses valores, estimou-se que a geração total de eletricidade de 1 m² do módulo em questão, por 25 anos, atinja aproximadamente 7.393 kWh.

Considerando que a matriz elétrica brasileira possui um fator de emissão de GEE de 99,6 gCO₂-eq/kWh, ou 0,0996 kgCO₂-eq/kWh (Mfumu, 2021), a geração de 7.393 kWh proveniente da matriz elétrica brasileira resulta em um PAG100 de cerca de 736,34 kgCO₂-eq.

A comparação entre a mesma quantidade de energia gerada por 1 m² do módulo fotovoltaico estudado e pela matriz elétrica brasileira revelou que o módulo fotovoltaico apresenta um PAG100 cerca de 46% menor. Ressalta-se que a matriz elétrica brasileira possui fatores de emissão significativamente inferiores aos de outros países, devido à predominância da geração hidrelétrica, o que resulta em emissões de GEE abaixo da média global (Mfumu, 2021). Caso este estudo fosse realizado adotando uma matriz elétrica com fator de emissão superior ao do Brasil, a comparação dos PAG100 associados ao módulo fotovoltaico com o daquela matriz destacaria ainda mais os benefícios ambientais da geração fotovoltaica nesse impacto ambiental.

Em termos de gCO₂-eq/kWh, o módulo fotovoltaico deste estudo, adotado nas condições estipuladas, gera aproximadamente 53,42 gCO₂-eq/kWh. Este valor quantificado do PAG está plenamente alinhado com as estimativas apresentadas por Santoyo-Castelazo et al. (2021), onde estudos de ACV de sistemas fotovoltaicos,

²⁶ Do inglês performance ratio

guardadas suas respectivas especificidades, determinaram emissões médias de GEE de $46,2 \pm 18 \text{ gCO}_2\text{-eq/kWh}$, assumindo uma distribuição estatística normal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira consistente com outros trabalhos da mesma natureza, a ACV realizada neste trabalho revelou que a etapa de fabricação é a principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com 82% do Potencial de Aquecimento Global para um horizonte de 100 anos (PAG100). Subetapas específicas, como a montagem do painel e a produção de silício monocristalino, demonstraram ser fatores críticos.

O percentual da contribuição da etapa de fabricação poderia ser reduzido caso a subetapa referente ao mercado global de silício em grau solar fosse tratada como um processo independente ou alocada na etapa de transporte. Entretanto, neste estudo, a subetapa foi incluída no estágio de fabricação, em conformidade com o inventário base utilizado.

Na comparação entre o PAG100 associado à mesma quantidade de energia gerada por 1 m² do módulo estudado e pela matriz elétrica brasileira, a energia proveniente do módulo fotovoltaico apresentou um PAG100 aproximadamente 46% inferior ao da matriz elétrica brasileira, reforçando a relevância ambiental da tecnologia fotovoltaica em relação às fontes convencionais. Este achado apoia a adoção crescente de energia solar, especialmente em um contexto de transição energética e descarbonização.

É importante destacar que este estudo não contemplou em sua análise os equipamentos e insumos complementares necessários para a geração fotovoltaica, como inversores, cabos, estruturas de fixação, entre outros, e não considerou a degradação gradual da eficiência dos módulos ao longo do tempo. Essas lacunas devem ser abordadas em trabalhos futuros para fornecer uma análise mais abrangente.

Adicionalmente, a adoção de uma abordagem "berço ao berço" apresenta potencial para melhorar o desempenho ambiental, promovendo a circularidade de materiais e reduzindo os impactos associados à fabricação e ao fim de vida. Outra recomendação é ampliar o escopo do estudo para incluir outras categorias de impacto ambiental e métodos de avaliação, de forma a proporcionar uma visão mais completa dos impactos.

Por fim, destaca-se que a primeira simulação da ACV foi realizada utilizando o método de análise de impacto CML 2001, resultando em um PAG100 de 21,74 kgCO₂-eq. Este valor mostrou-se significativamente inferior aos observados em estudos de mesma natureza que adotaram a abordagem *cradle-to-grave* e a unidade funcional de 1 m² (Gaidajis; Angelakoglou, 2012; Yue *et al.*, 2014). Tal discrepância indica a possível inadequação do método CML 2001 para a análise da categoria de impacto PAG100, reforçando a necessidade de avaliação crítica na escolha de métodos para estudos de ACV.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040:2009**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: Abnt, 2009a. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4914088/mod_folder/content/0/NBR%20ISO%2014040.pdf. Acesso em: 04 jan. 2025.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044:2009**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: Abnt, 2009b. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5560109/mod_resource/content/3/NBRISO14044%20.pdf. Acesso em: 16 ago. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 01 fev. 2025.

BICALHO, Marlon S. et al. Análise de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede da Universidade Federal De Itajubá – Campus Itabira. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 95-105, 19 fev. 2018. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v7i1.57971>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/57971>. Acesso em: 05 ago. 2023.

CARNEVALE, E. et al. Life Cycle Assessment of solar energy systems: comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale. **Energy**, [S.L.], v. 77, p. 434-446, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214010846>. Acesso em: 19 dez. 2024.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial Solar - SunData v 3.0**, 2024. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 15 dez. 2024.

CHUNG, Jaeshik et al. Comparative analysis of I2-KI and HNO3 leaching in a life cycle perspective: towards sustainable recycling of end-of-life c-si pv panel. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 404, p. 123989, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123989>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123989>. Acesso em: 23 ago. 2024.

CLAUDINO, Edison S. et al. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 77-85, jan. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662013000100011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/s43vSgWwvCVxSsTf8Mw5C/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 16 ago. 2024.

DIAS, Pablo R. et al. High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: technical, economic and environmental feasibility assessment. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 169, p. 112900, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112900>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122007821>. Acesso em: 29 fev. 2024.

DIAS, Pablo et al. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 165, p. 105241, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105241>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920305565>. Acesso em: 29 fev. 2024.

DIAS, Denise Oliveira et al. A gestão ambiental como ponte entre a empresa e os stakeholders. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 3, 20 abr. 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e120203-22>. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6722/4923. Acesso em: 16 ago. 2024.

DUTRA, Ana Carolina et al. Avaliação do ciclo de vida como uma ferramenta de análise de impactos ambientais e conceito aplicado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, [S.L.], n. 51, p. 15-27, 10 jun. 2019. Zeppelini Editorial e Comunicacao. <http://dx.doi.org/10.5327/z2176-947820190399>. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/78/442. Acesso em: 16 ago. 24.

ECOINVENT. **Ecoinvent database**, 2025. Disponível em: <https://ecoinvent.org/database/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

FERRÁNDEZ-GARCÍA, Antonio et al. Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls: a comparison of alternative solutions. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 112, p. 649-665, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.136>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.136>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FRISCHKNECHT, Rolf et al. **Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems**: iea pvps task 12: pv sustainability. [S.L.]: International Energy Agency (Iea), 2020. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2024.

FTHENAKIS, Vasilis M. et al. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 42, n. 6, p. 2168-2174, 6 fev. 2008. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es071763q>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/27715092_Emissions_from_photovoltaic_lifecycle_cycles. Acesso em: 12 dez. 2024.

GAIDAJIS, G.; ANGELAKOGLU, K.. Environmental performance of renewable energy systems with the application of life-cycle assessment: a multi-si photovoltaic module case study. **Civil Engineering And Environmental Systems**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 231-238, dez. 2012. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/10286608.2012.710608>. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1080/10286608.2012.710608>. Acesso em: 14 dez. 2024.

GANESAN, Kishore et al. Anticipatory life cycle analysis framework for sustainable management of end-of-life crystalline sil. **Energy**, [S.L.], v. 245, p. 123207, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.123207>. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123207>. Acesso em: 23 ago. 2024.

GREENDELTA. **OpenLCA Nexus**, 2024. Disponível em:
<https://nexus.openlca.org/about>. Acesso em: 26 dez. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Reports**, 2025. Disponível em:
<https://www.iea.org/analysis?type=report>. Acesso em: 19 jan. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy statistics 2024**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf. Acesso em: 01 fev. 2025.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 13 dez. 2024.

JIANG, Tingting et al. Performances of typical photovoltaic module production from the perspective of life cycle sustainability assessment. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 64, p. 103703, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2024.103703>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138824000997>. Acesso em: 23 fev. 2024.

JR, Arlindo P.; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e sustentabilidade**. Barueri: Editora Manole, 2016. E-book. ISBN 9786555761313. Disponível em:
<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555761313/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

KREBS-MOBERG, Miles et al. Third generation of photovoltaic panels: a life cycle assessment. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 164, p. 556-565, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.054>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120314798>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MAO, Dan et al. Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: a case study of crystalline silicon photovoltaic panels. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 434, p. 140320, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623044785>. Acesso em: 23 fev. 2024.

MFUMU, Kiala Muana. **Aplicação da avaliação do ciclo de vida no cálculo do fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil**. 2021. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7120f63b-6990-4723-a303-1669327974b6>. Acesso em: 14 dez. 2024.

ONU. **Objetivo de desenvolvimento sustentável**. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acesso em: 02 set. 2024.

QUEIROZ, Geandra Alves et al. Ciclo de Melhoria Contínua da Produção Enxuta considerando o desempenho ambiental: uma proposta conceitual estruturada no método dmaic / continuous improvement cycle of lean manufactu. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 3907-3924, 14 jan. 2022. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv8n1-257>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/42722>. Acesso em: 16 ago. 2024.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 3a ed. Barueri: Editora Manole, 2017. E-book. ISBN 9786555762242. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555762242/>. Acesso em: 14 mai. 2023.

RITZEN, M.J. et al. Carrying capacity based environmental impact assessment of Building Integrated Photovoltaics. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 31, p. 212-220, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138818303503>. Acesso em: 19 dez. 2024.

ROSSI, Federico et al. Comparative scenario-based LCA of renewable energy technologies focused on the end-of-life evaluation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 405, p. 136931, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136931>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623010892>. Acesso em: 23 fev. 2024.

SALIM, Hengky 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**, [S.L.], v. 211, p. 537-554, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618336321>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SANTOYO-CASTELAZO, E. et al. Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: a case study for Mexico. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 316, p. 128314, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128314>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621025294>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SICV BRASIL. **Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros**, 2025. Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

SILVA, Beatriz Lorrane Farias et al. Dimensionamento e viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. **Revista Produção Online**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 863-890, 20 set. 2021. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO. <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4342>. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/4342>. Acesso em: 05 ago. 2023.

TRINA SOLAR. **Tallmax**: tsm-de15m(ii), 2020. Disponível em: https://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN_TSM_DE15M%28II%29_datasheet_A_2020_web.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.

UNGARETTI, C. R. et al. A China pode afetar a transição energética na América Latina. **Textos para discussão IPEA**, n. 3076, 2025.

VEIGA, J. E. **O antropoceno e as humanidades**. SP: Ed. 34, 2023.

VIAN, Ângelo. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555500592. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555500592/>. Acesso em: 16 mai. 2023.

VINAYAGAMOORTHY, R. et al. Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 111715, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723024545>. Acesso em: 23 fev. 2024.

WAHRLICH, Júlia et al. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA: uma revisão. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 183, 17 jul. 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020183->

201. Disponível em: <https://biblio.ugent.be/publication/8676305>. Acesso em: 16 ago. 2024.

YUE, Dajun et al. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: life cycle energy and environmental comparative analysis. **Solar Energy**, [S.L.], v. 105, p. 669-678, jul. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.008>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14001935>. Acesso em: 19 dez. 2024.

CONCLUSÃO

A presente dissertação, composta por dois artigos complementares, buscou explorar diferentes aspectos da sustentabilidade dos painéis fotovoltaicos, com foco na reciclagem e na análise do ciclo de vida (ACV) desses dispositivos. O primeiro artigo, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), mapeou o estado da arte sobre a reciclagem de painéis fotovoltaicos em nível internacional, identificando as principais tendências de pesquisa. O segundo artigo, por sua vez, realizou uma ACV de um painel fotovoltaico de silício monocristalino, avaliando o Potencial de Aquecimento Global (PAG100) ao longo de seu ciclo de vida, desde a fabricação até o descarte, sob a abordagem "do berço ao túmulo".

A RSL evidenciou que a reciclagem de painéis fotovoltaicos é um campo emergente, com diversas tecnologias em desenvolvimento, como a reciclagem mecânica, química e térmica, que apresentam altas taxas de recuperação de materiais (até 95%) e reduzem significativamente os impactos ambientais, como a toxicidade e o aquecimento global. Além disso, a revisão destacou a importância da economia circular, que promove a reintegração de materiais recuperados na produção de novos painéis, reduzindo a necessidade de extração de matérias-primas e fortalecendo a sustentabilidade e a segurança energética. No entanto, a falta de regulamentações específicas para a reciclagem de painéis fotovoltaicos em muitos países, com exceção da União Europeia, representa um desafio significativo que precisa ser superado para garantir a gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos no futuro.

Já a ACV realizada no segundo artigo revelou que a etapa de fabricação é a principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com 82% do PAG100. A comparação entre o PAG100 da geração de energia elétrica do painel fotovoltaico e o da matriz elétrica brasileira demonstrou que a tecnologia fotovoltaica apresenta um PAG100 cerca de 46% menor, reforçando a relevância ambiental dessa fonte de energia renovável em relação às fontes convencionais.

A interconexão entre os dois artigos reside no fato de que a ACV, abordada no segundo artigo, é uma das linhas de pesquisa identificadas na RSL como fundamental para a compreensão dos impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos ao longo de seu ciclo de vida.

Em síntese, esta dissertação contribui para o campo da sustentabilidade dos painéis fotovoltaicos ao oferecer uma visão abrangente dos desafios e oportunidades associados à reciclagem e ao ciclo de vida desses dispositivos. A integração dos resultados dos dois artigos reforça a importância de se adotar práticas sustentáveis em todas as etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, desde a fabricação até o descarte, visando a redução dos impactos ambientais e a promoção de uma transição energética mais justa e sustentável.