



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

LOURENÇO PASSOS JOÃO

**IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E DESCARTE DO MÓDULO
FOTOVOLTAICO**

REDENÇÃO

2025

LOURENÇO PASSOS JOÃO

IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E DESCARTE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientadora: Profa. Dra. Janaína Barbosa Almada.

REDENÇÃO

2025

João, Lourenço Passos. J62i

Impacto ambiental da produção e descarte do módulo fotovoltaico
/ Lourenço Passos João. - Redenção, 2025.
58f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e
Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientadora: Profa. Dra. Janaína Barbosa Almada.

1. Energia fotovoltaica. 2. Impacto ambiental. 3. Módulo
fotovoltaico. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.47

LOURENÇO PASSOS JOÃO

IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E DESCARTE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em: 05 de junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Janaína Barbosa Almada (Orientadora)
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof. Dra. Rita Karolinny Chaves de Lima
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Dedico este TCC para as minhas mães, Catarina Francisco Passos e Ana Francisco Passos, que fizeram tudo para que meu sonho fosse realizado, sei que não estaria aqui sem vocês, minha vida pertence a vocês e essa vitória não é só minha, **essa vitória é nossa**. Obrigado Por tudo que vocês fizeram por mim, vosso filho agora é Engenheiro de Energias.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus pelo Dom da vida, pois ele me permitiu estar vivo até agora para concretizar este sonho de estar me formando em Engenharia de Energias.

Agradeço as minhas mães Catarina Francisco Passos e Ana Francisco Francisco Passos, que juntas fizeram muito por mim mesmo com o pouco que tinham, não há palavras para descrever o quão importante vocês são na minha vida e o quão importante foram para que eu finalizasse esse momento, eu irei honrar vocês até a morte.

Aos meus irmãos que depositaram uma confiança enorme em mim, que sempre apoiaram mesmo distante. Osvaldo Passos, Rosa Passos, Jorge Passos, Francisco Passos, e Catarina Passos. Muito obrigado.

Quero agradecer aos meus padrinhos, Helena Cauende e Edson Passos, lembro-me perfeitamente a felicidade de vocês quando eu contei-vos sobre a oportunidade que eu ganhei de estudar no Brasil. Vossa felicidade mostrou que sempre poderei contar com vocês.

A minha tia Luísa Passos que deu-me o melhor conselho "meu filho, não importa o que aconteça, só volte quando estiveres formado" muito obrigado tia. Estou voltando formado, seu sobrinho agora é um Engenheiro de Energias.

Ao meu grande amigo e irmão José Coxi, meu melhor amigo que juntos passamos por várias coisas nesta vida. Agradeço a Deus por ter te conhecido e por fazeres parte da minha vida. Obrigado pelos enormes conselhos que me fizeram não desistir durante essa trajetória, você sempre foi e sempre será uma inspiração para mim.

Um agradecimento especial aos meus dois sobrinhos, Bruno Cortes e Eliana Cortes, muitas vezes vocês foram minha motivação para não desistir, vocês sempre torceram por mim e sempre acreditaram em mim. Muito obrigado. Esse Tcc é vosso também.

Quero expressar também os meus agradecimentos a UNILAB, por me ter acolhido durante esses 5 anos, obrigado pela oportunidade.

É impossível sair do curso sem agradecer aos meus queridos professores, em especial, a professora Maria Cristiane de Sousa, professora que sinto um amor incondicional, que muito ajudou-me nesta trajetória do curso. Agradeço a professora Ada Amelia Sandres Lopes de "A - Bonita" como ela sempre dizia em sala de aula, muito obrigado professora, lembro perfeitamente o conselho que a senhora deu para mim quando eu quis desistir do curso, seu conselho foi o melhor que eu poderia ter. A professora Artemis Guimarães, muito obrigado professora pelos ensinamentos, a senhora é uma grande professora. A professora Karol, pela paciência e pelo

excelente ensino. A todos os professores do IEDS que contribuíram para a minha formação acadêmica. Nunca esquecendo a secretária Fabiana, por estar sempre disposta a ajudar-nos.

Quero expressar os meus agradecimentos a minha orientadora, professora Janaina Barbosa Almada, muito obrigado por ter aceite este convite, sei que não foi fácil, mudei de temas umas duas vezes, mas a professora sempre esteve lá para ajudar e dar a melhor orientação possível. Mesmo entregando o TCC muito encima do prazo, a senhora sempre esteve aqui para dar-me o melhor suporte e ir até onde poderíamos. Obrigado professora.

Obrigado aos membros do CAENE e aos estudante de curso por aceitarem com que seu fosse o vosso presidente.

Não posso jamais deixar de agradecer, aos meus colegas de curso que juntos batalhamos para chegar até aqui, João Nogueira e Garcia Neves, muito obrigado irmãos de luta.

Um agradecimento aos diversos amigos que eu fiz na trajetória desse curso, Engenheiro Hóstido, Engenheiro Jued, Engenheiro Esmiraldo, Engenheiro Tilfo e sem esquecer do meu grande amigo e irmão Engenheiro Jonas Israel, Deus cuide das vossas vidas e que tenham muito sucesso na vida profissional.

Aos companheiros de casa, Pedro Mulengui, Fredy Alves, Mateus Mutocola e Paulo Bumba.

Quero agradecer também a Victória Lino Francisco e Cécilia Welema Beio por cuidarem de mim quando tive uma hemorragia externa de 8h. Agradeço a Deus por ter vocês em minha vida.

Um agradecimento especial a Engenheira Nicole Joaquim, engenheira de mlhões. Deus te abençoe e que tenhas muito sucesso na sua vida profissional.

Agradeço também a Susana Joaquim, que cuidou da tradução em inglês do meu resumo. Obrigada Engenheira Susan.

Por fim, quero agradecer a especial a "Princesa May" obrigado por cruzar a minha vida, obrigado por várias vezes cobrar-me sobre o meu TCC. Obrigado pelo apoio, por rezar por mim e por fazer-me conhecer mais sobre Deus. Meu carinho por você é enorme. Obrigado por tudo, você sempre terá um espaço guardado no meu coração.

Obrigado a todos.

"Peça a Deus que abençoe todos os seus planos
que eles darão certo" (Provérbios 16:3)

RESUMO

A energia solar fotovoltaica é a fonte de energia renovável com maior destaque no cenário de energias alternativas atualmente, sendo uma fonte estratégica no panorama energético global. No entanto, embora a fase de operação não cause impactos ambientais significativos, é essencial discutir a produção e o descarte dos equipamentos que compõem os sistemas fotovoltaicos, pois esses processos geram impactos ambientais consideráveis. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos socioambientais associados ao ciclo de vida do principal equipamento desses sistemas, os módulos fotovoltaicos, desde a extração da matéria-prima até o descarte final. Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica que busca apresentar o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos e, a partir disso, realizar uma análise crítica dos dados relacionados ao processo de fabricação, uso e descarte desses equipamentos. Os resultados mais relevantes mostram que é na fase de manufatura que há maiores impactos devido à extração da matéria-prima e ao alto consumo de energia. A etapa de operação não apresenta impactos significativos ao passo que na fase de descarte apresenta impactos relevantes, e sua mitigação carece de estratégias de reciclagem adequadas. No que diz respeito às políticas públicas de regulamentação, a União Europeia possui as regulamentações mais avançadas, enquanto países como China, Índia e Brasil ainda estão em processos de implementação de normas específicas para a gestão adequada dos resíduos dos módulos fotovoltaicos. Diante disso, conclui-se que, para garantir a sustentabilidade da energia solar, é fundamental considerar o ciclo de vida dos módulos e promover cada vez mais ações como logística reversa, reciclagem, conscientização e implementação de políticas públicas.

Palavras-chave: impacto ambiental; energia fotovoltaica; ciclo de vida; módulo fotovoltaico, resíduos fotovoltaicos

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is a renewable energy source that currently stands out in the field of alternative energies, being a strategic source in the global energy scenario. However, although the operation phase does not cause significant environmental impacts, it is essential to discuss the production and disposal of the equipment that comprises photovoltaic systems, as these processes generate considerable environmental impacts. Thus, this study aims to analyze the socio-environmental impacts associated with the life cycle of the main equipment of these systems—the photovoltaic modules—from raw material extraction to final disposal. This study consists of a literature review that seeks to present the life cycle of photovoltaic modules and, from that, carry out a critical analysis of the data related to the manufacturing, use, and disposal processes of this equipment. The most relevant results show that the manufacturing phase presents the greatest impacts due to raw material extraction and energy consumption. The operation phase does not present significant impacts, whereas the disposal phase presents relevant impacts, and its mitigation lacks adequate recycling strategies. Regarding public regulatory policies, the European Union has more advanced regulations, while countries such as China, India, and Brazil are still in the process of implementing specific standards for the proper management of photovoltaic module waste. Therefore, it is concluded that, to ensure the sustainability of solar energy, it is essential to consider the life cycle of the modules and increasingly promote actions such as reverse logistics, recycling, awareness, and the implementation of public policies.

Keywords: Environmental impact; photovoltaic energy; life cycle; photovoltaic module; photovoltaic waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ranking Mundial de Energia Solar em 2024	16
Figura 2 – Diferença entre célula, módulo e arranjo (ou painel) fotovoltaico	19
Figura 3 – Representação dos módulos de primeira geração.....	20
Figura 4 – Representação do módulo de segunda geração	20
Figura 5 – Representação do módulo de terceira geração	21
Figura 6 – Componentes do módulo fotovoltaico	22
Figura 7 – Fase da avaliação do ciclo de vida	24
Figura 8 – Ciclo de vida do módulo fotovoltaico	25
Figura 9 – Visão geral das projeções globais de resíduos de módulo fotovoltaico	32
Figura 10 – Logística reversa do módulo fotovoltaico	34
Figura 11 – Benefícios da logística reversa do módulo fotovoltaico	36
Figura 12 – Opções para gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (4Rs)	37
Figura 13 – Processo de reciclagem do módulo solar fotovoltaico	39
Figura 14 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura .	41
Figura 15 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura (continuação)	42
Figura 16 – Importância da reciclagem do módulo fotovoltaico	43
Figura 17 – Fluxograma da Metodologia	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do módulo fotovoltaico	23
Tabela 2 – Impactos causados pela instalação de usinas fotovoltaicas de médio e grande porte.....	29
Tabela 3 – Impactos socioambientais do chumbo e do cádmio	30
Tabela 4 – Destino final de alguns componentes no final do processo de reciclagem	40
Tabela 5 – Principais impactos ambientais na produção de módulos fotovoltaicos.....	48
Tabela 6 – Políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos por país	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
EVA	Acetato de Vinilo de Etileno
GD	Geração Distribuída
INCA	Instituto Nacional do Câncer
IRENA	International Renewable Energy Agency
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>ft</i>	Fotovoltaico
<i>CH₄</i>	Metano
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>N₂O</i>	Óxido Nitroso
<i>HCl</i>	Ácido clorídrico
<i>HF</i>	Ácido fluorídrico
<i>PFCs</i>	Perfluorcarbonetos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>18</i>
1.2	Estrutura do Trabalho.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Módulo fotovoltaico.....	19
<i>2.1.1</i>	<i>Composição do módulo fotovoltaico</i>	<i>21</i>
2.2	Avaliação do ciclo de vida	23
<i>2.2.1</i>	<i>Avaliação do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico</i>	<i>25</i>
2.3	Impactos ambientais associado ao ciclo de vida do módulo fotovoltaico .	26
<i>2.3.1</i>	<i>Impactos ambientais na fabricação do módulo fotovoltaico</i>	<i>26</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Impactos na construção das usinas</i>	<i>28</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Impactos ambientais do descarte do módulo fotovoltaico</i>	<i>29</i>
2.4	Gestão do fim de vida útil do módulo fotovoltaico.....	31
2.5	Soluções para reduzir os impactos ambientais.....	33
<i>2.5.1</i>	<i>Logística reversa aplicada aos módulos fotovoltaicos</i>	<i>33</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Reciclagem do módulo fotovoltaico</i>	<i>36</i>
<i>2.5.2.1</i>	<i>Tecnologias aplicadas na reciclagem.....</i>	<i>38</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Conscientização</i>	<i>42</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos existentes no mundo .</i>	<i>43</i>
3	METODOLOGIA	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável que mais tem se destacado no cenário das energias alternativas nas últimas décadas. É uma energia que se baseia na radiação solar. Uma tecnologia que permite a conversão direta da luz solar em eletricidade através de módulos fotovoltaicos (GRECO, 2023).

Transformar a radiação solar em vetores energéticos como eletricidade e calor vem se tornando uma das apostas mais promissoras para o futuro energético a nível mundial, considerando principalmente que os custos da sua geração e distribuição diminuem à medida que as tecnologias avançam (GRECO, 2023).

A atual utilização de energia solar fotovoltaica se deve ao físico francês Alexandre Edmond Becquerel que, em 1839, descobriu o efeito fotovoltaico. Já a célula fotovoltaica, equipamento responsável pela conversão em eletricidade, foi inventada apenas em 1883 por Charles Fritts na cidade de Nova York (SOLAR, 2024b).

De acordo com SOLAR (2024b), uma das primeiras utilizações de painéis solares ocorreu, em 1958, no espaço, quando o satélite *Vanguard I* foi lançado, com o auxílio de um painel de 1 W para alimentar seu rádio na viagem. Além disso, foram construídas as primeiras instalações solares em casas. Esse foi o início da aplicação da energia solar fotovoltaica como fonte de eletricidade (GRECO, 2023).

Atualmente, a energia solar fotovoltaica tem se consolidado como uma das principais alternativas no panorama energético global, ocupando posições estratégicas cada vez mais relevantes. De acordo com um recente relatório da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2016), seu crescimento acelerado a tornou a única fonte de energia renovável capaz de acompanhar o ritmo necessário para a meta de triplicar a produção global de energias renováveis até 2030. Outras fontes, como a energia eólica e a energia hídrica, ainda estão distantes de alcançar esse objetivo. A energia solar tem gerado grandes progressos, impulsionada pela diminuição dos custos e pelo aumento da demanda global por energias menos agressivas ao meio ambiente (ENERGY, 2024).

Segundo a Associação Brasileira de Energias Renováveis, em 2024, países como a China, os EUA, o Japão, a Alemanha e a Índia vêm liderando o ranking de países que mais geram energia solar fotovoltaica no mundo, como pode ser visto na Figura 1 (ABSOLAR, 2024; IRENA, 2024; SAFIRASOLAR, 2024). Essa lista considera dados de Geração Distribuída (GD), empresas, residências, prédios comerciais e residenciais que instalaram sistemas de energia solar.

Na classificação, a China mantém a liderança, superando mais de 4 vezes os EUA. O Brasil subiu duas posições em relação ao ano de 2022, em que estava na oitava posição, alcançando agora a sexta posição.

Figura 1 – Ranking Mundial de Energia Solar em 2024



Fonte: (SAFIRASOLAR, 2024)

Outro benefício observado, durante o crescimento na utilização da energia fotovoltaica, foi a geração de empregos. Um levantamento, divulgado pela Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), informou que até o ano de 2030, entre as várias fontes de energia limpa, a energia solar vai liderar a geração de empregos com 11,6 milhões de novos postos de trabalho (ENERGIA, 2023).

A energia fotovoltaica não contribui durante sua operação com a emissão de gases de efeito estufa e poluentes. Ela também apresenta vantagens econômicas como a redução de custo de energia e minimização da dependência de combustíveis fósseis, que são finitos e estão se tornando cada vez mais caros. Essas características levaram muitos países a incluir a energia fotovoltaica como um elemento importante para impulsionarem suas estratégias de diversificação da matriz energética (SOLAR, 2022).

Apesar de todos os benefícios já mencionados, é fundamental considerar os impactos socioambientais que os módulos fotovoltaicos podem causar ao final de sua vida útil. Esses equipamentos possuem uma vida útil estimada entre 25 e 30 anos, período que, em geral, corresponde ao prazo de garantia oferecido pelos fabricantes (INSPIRA, 2023).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos sistemas fotovoltaicos vem sendo amplamente estudada, porém ainda há lacunas em pesquisas relacionadas aos impactos ambientais, tanto na fase de produção quanto no descarte dos módulos fotovoltaicos. Investigações nessa área são importantes para compreender a sustentabilidade desses sistemas, avaliar as implicações ao final de sua vida útil e propor alternativas viáveis para mitigar os impactos identificados (KONZEN; PEREIRA, 2020).

Apesar da vida útil de 25 a 30 anos, os módulos fotovoltaicos representam uma preocupação futura, especialmente devido ao seu uso em larga escala. Por se tornarem cada vez mais comuns, espera-se que gerem toneladas de resíduos ao final de sua vida útil. O tratamento desses resíduos deve ser cuidadosamente planejado e gerido, a fim de minimizar os impactos ambientais associados. Em 2016, a International Renewable Energy Agency (IRENA) calculou que já existiam no mundo cerca de 250 mil toneladas de resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos, um número que tende a crescer devido ao crescimento constante na sua utilização (GÓES *et al.*, 2023).

Por isso, é importante conhecer, analisar e divulgar todas as etapas de produção até o descarte final desses equipamentos, visando determinar métodos que possam reduzir os impactos socioambientais de sua utilização.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de investigar os impactos ambientais que estão associados à produção e ao descarte dos módulos fotovoltaicos e que também traga soluções e estratégias que possam reduzir os efeitos negativos da produção e descarte dos módulos fotovoltaicos. Além disso, espera-se que esta pesquisa contribua para discussões de políticas públicas de iniciativas empresariais que venham a minimizar esses problemas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar, por meio de revisão bibliográfica, uma análise dos impactos ambientais ao longo da vida útil dos módulos fotovoltaicos, com foco na produção e no descarte desses equipamentos. Com base nessa análise, busca-se avaliar soluções sustentáveis e estratégias que minimizem tais impactos, contribuindo para o fortalecimento da sustentabilidade na utilização da energia fotovoltaica.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Identificar a composição dos módulos fotovoltaicos;
- Compreender o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos;
- Apresentar os impactos ambientais dos módulos fotovoltaicos no decorrer do seu ciclo de vida, com o foco na produção e no descarte final;
- Avaliar como a reciclagem desses equipamentos pode minimizar os impactos ;
- Apresentar regulamentações, políticas públicas e normas internacionais que incentivam práticas sustentáveis na fabricação e descarte de módulos fotovoltaicos;

1.2 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho está dividida em 5 capítulos. O capítulo inicial aborda a contextualização da energia solar e os motivos de sua grande utilização atualmente, mostrando que, no longo prazo, pode haver problemas com a quantidade de módulos como resíduos. São apresentados também os objetivos e a justificativa deste trabalho.

O segundo capítulo consiste na fundamentação teórica sobre o tema abordado, na qual buscou-se bases teóricas para dar sustento ao presente trabalho.

O terceiro capítulo consiste na metodologia do trabalho, apresentando os métodos que foram usados para se chegar aos resultados desta pesquisa.

O quarto capítulo apresenta os resultados e as discussões no final da pesquisa. Por fim, no quinto capítulo, tem-se a conclusão de todos os pontos que foram discutidos no decorrer do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Módulo fotovoltaico

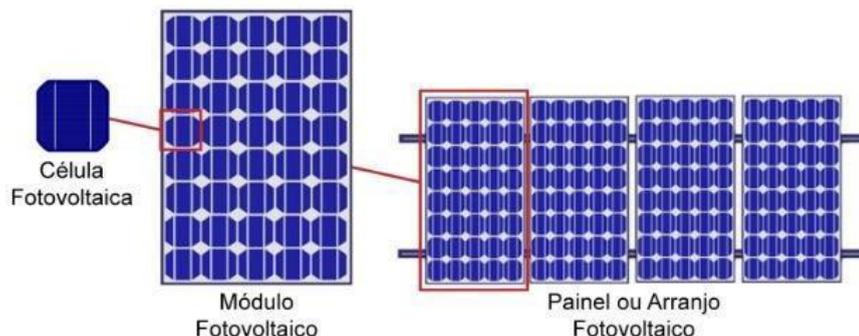
A eletricidade produzida diretamente a partir da radiação solar é denominada energia solar fotovoltaica. Esse processo ocorre por meio de módulos fotovoltaicos que operam com base no efeito fotovoltaico (GHIZONI, 2016).

O efeito fotovoltaico ocorre quando a radiação solar é absorvida por um material semicondutor, provocando a migração de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Por esse processo, é gerada uma corrente elétrica dentro das células fotovoltaicas. Essa célula absorve os fótons, que são elementos de energia presentes na luz do sol, fazendo assim com que haja um deslocamento de elétrons e gerando uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos, resultando na conversão da luz solar em eletricidade (GHIZONI, 2016).

Nos sistemas fotovoltaicos, o módulo fotovoltaico é o principal componente de geração de energia, pois constitui a primeira parte do sistema, sendo responsável pela captação da radiação solar recebida e sua conversão em energia elétrica, por meio de um conjunto de células fotovoltaicas que o compõem (PEREIRA; FILIPE, 2011).

Na construção dos módulos, as células fotovoltaicas são consideradas o elemento básico. Elas são geralmente conectadas em série ou em paralelo, formando os módulos fotovoltaicos. Quando esses módulos são interligados, dão origem aos painéis solares, ou arranjos fotovoltaicos, como ilustrado na Figura 2 (MORAES, 2020).

Figura 2 – Diferença entre célula, módulo e arranjo (ou painel) fotovoltaico

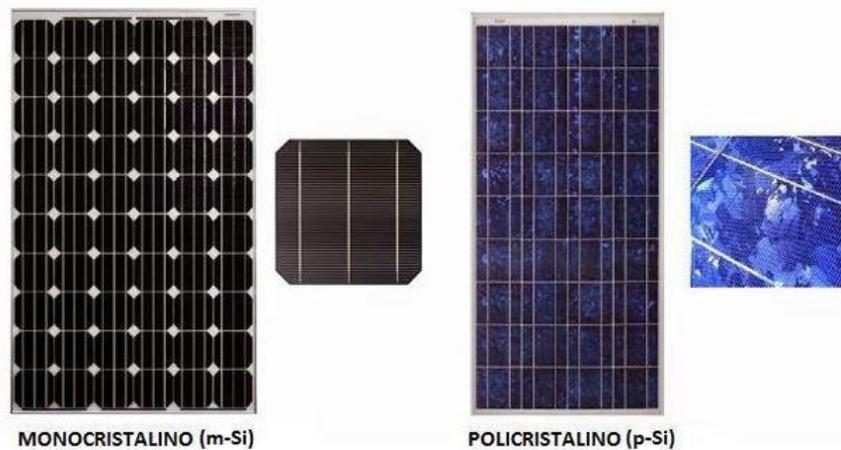


Fonte: (MORAES, 2020)

A fabricação dos módulos fotovoltaicos tem, até hoje, três grandes gerações (ALMEIDA *et al.*, 2015). Os módulos de primeira geração são os mais usados globalmente, representando mais de 85% do mercado. A tecnologia da primeira geração é mais consolidada,

por ser confiável e, também, por possuir melhor eficiência. Estes módulos, fabricados com diferentes cristais de silício, os de silício monocristalino (m-Si) e os de silício policristalino (p-Si), como apresentado na Figura 3 (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3 – Representação dos módulos de primeira geração.



Fonte: (GHIZONI, 2016)

De acordo com Konzen e Pereira (2020), a segunda geração de módulos, conhecida como módulos de filme fino, é considerada mais moderna e mais leve em comparação com os módulos da primeira geração. No entanto, apresenta menor eficiência e baixa participação no mercado. Durante a fabricação, esses módulos consomem uma quantidade reduzida de matéria-prima (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 4 mostra um exemplo deste módulo.

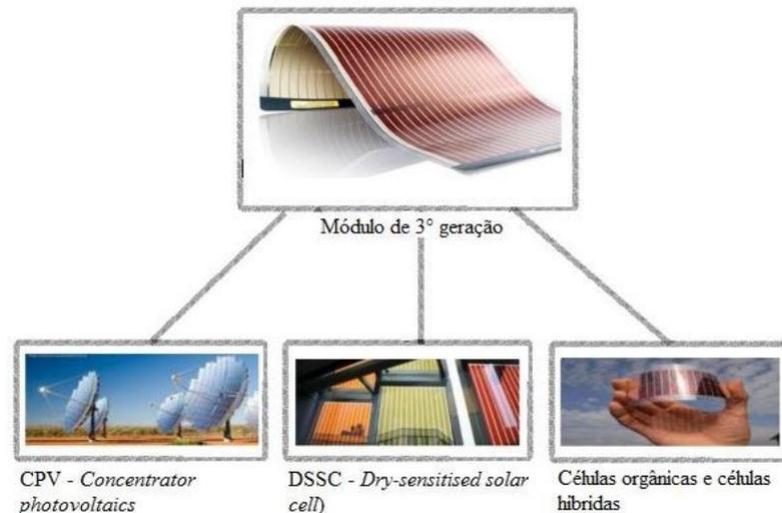
Figura 4 – Representação do módulo de segunda geração.



Fonte: (GHIZONI, 2016)

Os módulos de terceira geração são módulos que ainda se encontram em fase de pesquisa e desenvolvimento, assim como em testes de produção (PINHO; GALDINO, 2014). Esses módulos são classificados como módulos de CPV (*concentrator photovoltaics*), módulos DSSC (*dry-sensitised solar cell*), módulos com células orgânicas e/ou células híbridas, tais como mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Representação do módulo de terceira geração



Fonte: (GHIZONI, 2016)

Pupin (2019), ressalta que, por mais que esses módulos estejam ainda em fase de desenvolvimento, o objetivo é que alcancem desempenho e eficiência como os módulos de primeira geração, porém com um custo de produção igual ou menor em relação à capacidade de conversão de energia.

2.1.1 Composição do módulo fotovoltaico

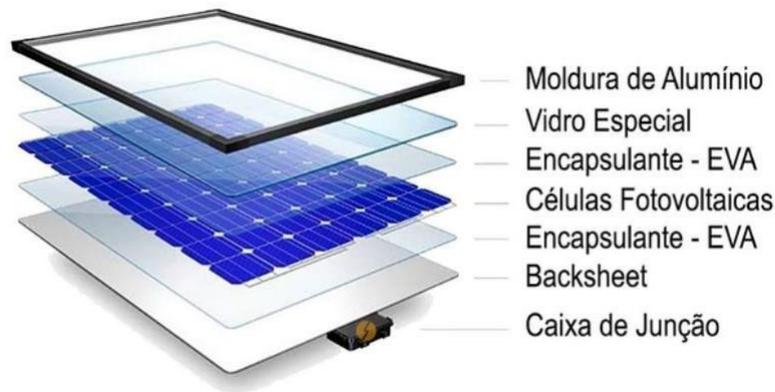
Os resíduos gerados ao final da vida útil do módulo fotovoltaico são determinados por cada componente que o compõe, assim como os métodos de tratamento e a sua eliminação (TONHOLI, 2021).

Este trabalho tem como foco os módulos fotovoltaicos de primeira geração, pois é a tecnologia mais consolidada e dominante e, conseqüentemente, serão os responsáveis pela maior parte da geração de resíduos (OLIVEIRA, 2021).

A Figura 6 mostra as diversas camadas que compõem o módulo fotovoltaico. Entre as camadas tem-se a moldura de alumínio anodizado, o vidro de proteção (fabricação específica para a aplicação), filme encapsulante - Acetato de Vinilo de Etileno (EVA), células fotovoltaicas,

backsheet (material plástico na base do módulo) e por fim, a caixa de junção (DINIZ, 2023).

Figura 6 – Componentes do módulo fotovoltaico



Fonte: (SOLAR, 2024a)

O vidro da camada superior é o componente mais pesado do módulo fotovoltaico. Sua espessura costuma ser de 3,2 mm, podendo variar entre 2 e 4 mm. Sua principal função é proteger o módulo e garantir resistência mecânica, mantendo alta transparência (FREIRE, 2018). Para aumentar a durabilidade, é projetado para resistir ao impacto de granizo e outros detritos. Além disso, é fabricado com propriedades antirreflexivas para permitir a máxima passagem da radiação solar até as células fotovoltaicas (PUPIN, 2019). Segundo TONHOLI (2021), outras características também devem ser consideradas para o bom desempenho do vidro fotovoltaico, como o baixo teor de ferro e a ausência de ondulações ou quaisquer irregularidades em sua superfície.

Em camadas subsequentes, utiliza-se o filme encapsulante conhecido como EVA, posicionado sobre a superfície das células fotovoltaicas. Sua função é protegê-las, tanto na parte frontal quanto na posterior, contra o envelhecimento provocado por temperaturas extremas, radiação UV e umidade (OLIVEIRA, 2021).

Após a aplicação do filme encapsulante (EVA), localiza-se a camada ativa do módulo: as células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica (TONHOLI, 2021). Essas células são produzidas a partir de silício ultrapuro, material semicondutor essencial para o processo de geração fotovoltaica. Devido à sua reduzida espessura, em torno de 2 mm, apresentam alta fragilidade mecânica, exigindo cuidados rigorosos durante o manuseio e a etapa de laminação, a fim de evitar fissuras ou fraturas que comprometam o desempenho do módulo (SOLAR, 2024a).

Outra camada de proteção é colocada na parte traseira da célula, chamada backsheet.

Sua função é proteger todos os componentes internos do módulo contra a entrada de gases e umidade, além de atuar como isolante elétrico. Geralmente, é composta por materiais plásticos e polímeros diversos em sua constituição (OLIVEIRA, 2021).

A caixa de junção é responsável por realizar a conexão elétrica entre as células, possibilitando o funcionamento do módulo (PUPIN, 2019). Ela é fixada na parte traseira do módulo, normalmente com o uso de fita dupla face especial ou adesivos de silicone (SOLAR, 2024a).

A moldura de alumínio é a última parte a ser montada no processo. Sua função é proteger as extremidades, garantir a resistência mecânica e envolver o módulo. Para evitar umidade, é depositada, para selar a moldura, uma camada de silicone ou fita selante (FREIRE, 2018).

A Tabela 1 mostra a distribuição percentual dos materiais que compõem cada uma das camadas descritas de um módulo fotovoltaico de silício cristalino (c-Si).

Tabela 1 – Componentes do módulo fotovoltaico

Componente	Porcentagem (%)
Vidro (com 0,01-1% Antimônio/kg de vidro)	70
Moldura de alumínio (Al)	18
Encapsulante (EVA)	5,1
Célula Solar (C-Si)	3,65
Backsheet (PVF)	1,5
Cabos (Cu e polímeros)	1,0
Condutor interno (Al)	0,53
Condutor interno (Cu)	0,11
Prata (Ag)	0,053
Outros metais (Sn, Pb)	0,053

Fonte: elaborada pelo autor e adaptado de (FREIRE, 2018)

2.2 Avaliação do ciclo de vida

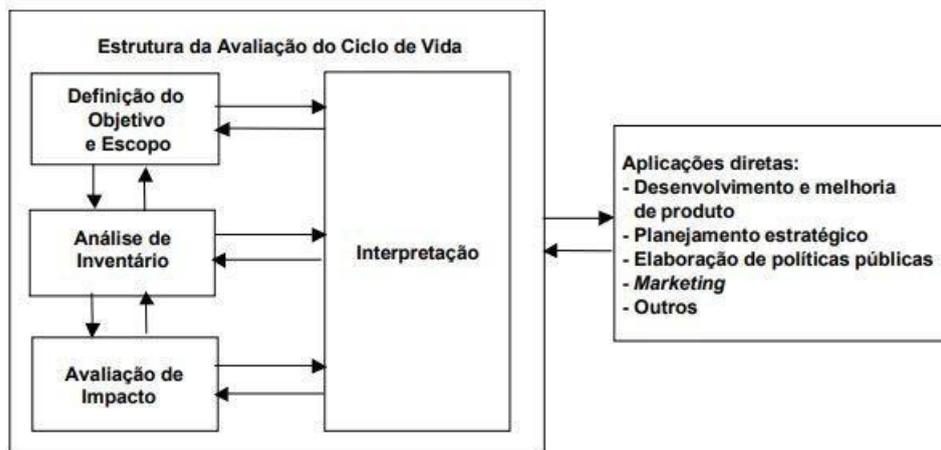
De acordo com o IBICT (2024) - Instituto Brasileiro de Informação em Ciências e Tecnologia, a ACV é um método criado para avaliar todos os impactos ambientais que estão associados à produção, utilização e descarte de um determinado produto ou serviço. Para tanto, é necessária a coleta de dados em todas as etapas da concepção de um produto, desde a extração da matéria-prima até sua reciclagem.

A ACV permite identificar quais são os estágios durante o ciclo de vida que estão contribuindo de forma mais significativa para os impactos ambientais. Essa identificação torna

mais fácil avaliar e implementar ou apresentar melhorias para que os produtos, processos ou serviços sejam mais sustentáveis (COLTRO *et al.*, 2007).

A ACV pode ser dividida em quatro fases, conforme apresentada na Figura 7. A primeira fase consiste na definição do objetivo e do escopo. Nessa etapa, determinam-se o propósito do estudo e sua abrangência, além de se tomarem decisões importantes sobre as fronteiras do sistema e a unidade funcional. É fundamental que o objetivo da análise seja claro e específico, indicando precisamente o que se pretende alcançar. Também devem ser estabelecidos os requisitos de qualidade dos dados necessários para garantir a confiabilidade dos resultados.

Figura 7 – Fase da avaliação do ciclo de vida



Fonte: (COLTRO *et al.*, 2007)

A segunda fase é a análise de inventário. Nela, são coletados e organizados os dados relativos às entradas e saídas do sistema avaliado, como a extração de matéria-prima, o transporte, o uso, a aplicação e o destino final do produto ou serviço. Apenas os dados mais relevantes para o sistema em estudo são considerados, visando manter a análise focada e eficiente.

Na terceira fase, realiza-se a avaliação de impactos, que busca identificar e analisar os impactos ambientais mais significativos associados ao sistema. Essa avaliação permite compreender a magnitude e a relevância desses impactos, fornecendo subsídios para a tomada de decisões mais sustentáveis.

Por fim, a quarta fase é a interpretação. Nessa etapa, os resultados obtidos nas fases anteriores são integrados e analisados à luz dos objetivos previamente definidos. O objetivo é extrair conclusões coerentes e propor recomendações que possam orientar ações futuras de maneira fundamentada (COLTRO *et al.*, 2007).

2.2.1 Avaliação do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico.

Como abordado na seção 2.2, a ACV é uma análise que envolve uma sequência de etapas interligadas. Para o módulo fotovoltaico, a avaliação inicia pelos processos de extração das matérias-primas até o descarte final do equipamento após anos de funcionamento (IRENA, 2016). O processo do ciclo de vida é apresentado na Figura 8, com destaque na extração de matérias-primas até a possibilidade de reciclagem no final da vida útil do módulo.

Figura 8 – Ciclo de vida do módulo fotovoltaico



Fonte: Baseada em (IRENA, 2016); (AGENCY, 2023)

O início do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico consiste na extração de matérias-primas como alumínio, silício e outros metais nobres. Essa primeira fase tem os maiores impactos ambientais do ciclo por causa do uso intensivo de energia e da degradação de ecossistemas envolvidos (AGENCY, 2023).

A etapa seguinte envolve o processamento das matérias-primas extraídas. Um exemplo desse processo é a purificação do silício, principal matéria-prima utilizada na fabricação das células fotovoltaicas. Essa etapa tem um impacto significativo na energia incorporada ao módulo. Na sequência, ocorre a montagem do módulo, que consiste na organização de todas as

camadas que compõem o equipamento, conforme ilustrado na seção 2.1.1 (IRENA, 2016).

Concluída a fase de fabricação, os módulos fotovoltaicos são transportados até o local final de instalação. Durante a operação dos sistemas fotovoltaicos, a principal exigência é a realização de manutenções periódicas, como a limpeza dos módulos e a verificação do sistema elétrico, a fim de garantir o bom funcionamento do sistema. Vale destacar que, nessa fase, não há emissão de gases poluentes, caracterizando-se como um período em que a geração de eletricidade ocorre de forma limpa e sustentável (IRENA, 2016).

O ciclo de vida do módulo se encerra com o descomissionamento ou desmantelamento. Nessa fase, os módulos devem ser recolhidos e destinados às entidades responsáveis pela gestão de resíduos. Alguns componentes podem ser reaproveitados ou encaminhados para processos de reciclagem, permitindo a recuperação de materiais como alumínio, vidro e até mesmo o silício (IRENA, 2016; AGENCY, 2023). Essa recuperação é fundamental para evitar o acúmulo de resíduos potencialmente perigosos e para reduzir a necessidade de extração de novos recursos naturais para a produção de novos módulos. Já os materiais que não podem ser reciclados são destinados a aterros sanitários (SCOLLA, 2020).

2.3 Impactos ambientais associado ao ciclo de vida do módulo fotovoltaico

De acordo com Pupin (2019), impacto ambiental é qualquer atividade humana que altera as condições naturais da saúde, da biodiversidade, das atividades sociais e econômicas, do bem-estar da população, do ecossistema, da qualidade dos recursos ambientais, entre outros fatores — podendo gerar efeitos tanto positivos quanto negativos.

O impacto ambiental associado aos módulos fotovoltaicos abrange todos os efeitos sobre os ecossistemas, o consumo de energia, a biodiversidade, a gestão de resíduos, entre outros aspectos relevantes (GREEN, 2024).

Portanto, é importante realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos módulos fotovoltaicos, a fim de assegurar que a energia solar se mantenha como uma fonte verdadeiramente sustentável de geração elétrica (PRANA, 2024).

2.3.1 Impactos ambientais na fabricação do módulo fotovoltaico

A etapa de manufatura é aquela que apresenta os maiores impactos negativos na produção dos módulos fotovoltaicos. Nessa fase, ocorre o maior consumo de energia, pois é nela

que se inicia a extração das matérias-primas — a primeira etapa do processo de fabricação dos módulos (SCOLLA, 2020).

A extração dessas matérias-primas provoca um aumento temporário da população nas regiões mineradoras, o que, por sua vez, gera um maior fluxo de veículos, acúmulo de resíduos sólidos ao longo do processo e produção de efluentes líquidos resultantes das atividades de mineração. De forma resumida, esses impactos podem ser observados nos seguintes pontos (COSTA *et al.*, 2024):

- Poluição da água: A contaminação química ocorre por meio de efluentes que se dissolvem na água utilizada no tratamento do minério ou na água que atravessa a área de mineração.
- Tráfego de veículos: Diversos veículos circulam constantemente durante o processo de extração dos materiais, gerando poeira, emissões gasosas e ruídos que contribuem para a poluição sonora. Esse tráfego intenso também afugenta a fauna local e aumenta o risco de atropelamento de animais em seu habitat natural.
- Rejeitos: Os materiais com baixo aproveitamento durante o processo geram rejeitos que, se não forem devidamente tratados, podem se tornar um grave problema ambiental. Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem se acumular em rios e lagos próximos, contaminando a água e afetando diretamente a saúde humana e dos ecossistemas que dependem dessa fonte.

A produção de módulos fotovoltaicos requer o uso de diversos materiais, como vidro, silício, e metais como alumínio, prata, entre outros. A extração desses recursos naturais acarreta consequências ambientais significativas, como a poluição do ar e da água, destruição de habitats naturais e erosão do solo (PRANA, 2024).

O principal elemento utilizado na composição dos módulos fotovoltaicos é o silício. Sua extração demanda grandes quantidades de energia, geralmente proveniente de fontes não renováveis, o que resulta na emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, torna a produção de silício menos sustentável do ponto de vista ambiental (PRANA, 2024). Além disso, a extração pode provocar a contaminação da água e do solo com produtos químicos tóxicos à saúde humana, como o ácido clorídrico (*HCl*) e o ácido fluorídrico (*HF*) (SUNNE, 2024).

Outros impactos ambientais estão relacionados ao processo de purificação do silício, necessário para que ele atinja a pureza exigida em aplicações fotovoltaicas. Esse processo é composto por cinco etapas principais: (1) extração do silício; (2) produção de silício metalúrgico; (3) purificação; (4) processamento dos dispositivos; e (5) encapsulamento. Todas essas fases

são altamente intensivas em energia — geralmente oriunda de fontes fósseis — e contribuem significativamente para a emissão de gases de efeito estufa. Durante o processamento, há liberação de pó de sílica, cuja inalação pode causar sérios danos à saúde humana (YABUTA, 2016).

Segundo o Instituto Nacional do Câncer (INCA), trabalhadores expostos constantemente ao pó de sílica têm de duas a três vezes mais chances de desenvolver câncer de pulmão em comparação com a população em geral. Além disso, estão mais suscetíveis a outras doenças, como câncer de estômago, câncer de fígado, anemia hemolítica, entre outras (AIR, 2022).

O vidro, outro componente dos módulos, tem como matéria-prima principal a areia. Sua extração pode provocar impactos ambientais significativos, alterando, por exemplo, as características naturais de rios e ecossistemas associados (MARTINS, 2020). Durante a produção do vidro, há ainda elevado consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O), todos com alto potencial de aquecimento global (MACHADO, 2024).

A extração e produção do alumínio também estão associadas à liberação de poluentes atmosféricos, incluindo dióxido de carbono (CO_2) e perfluorcarbonetos (PFCs), cujos efeitos sobre o aquecimento global são entre 6.500 e 9.200 vezes mais potentes que o CO_2 (ECYCLE, 2023).

Por fim, a extração do cobre, outro material presente nos módulos, pode gerar impactos negativos como a destruição de habitats naturais, além de contribuir para a poluição do ar e da água (PRANA, 2024).

2.3.2 Impactos na construção das usinas

É importante destacar que, durante a etapa de construção das usinas, os impactos mais significativos estão relacionados a projetos de grande porte, na geração centralizada, que ocupam vários hectares de terra para a instalação dos painéis. Por outro lado, na geração distribuída — como em pequenos comércios e residências — os módulos são, em geral, instalados nos telhados, e os impactos sobre o solo são considerados nulos, já que não há interferência direta na terra.

Diante disso, os impactos analisados a seguir referem-se exclusivamente à geração centralizada, sendo avaliados sob três aspectos: meio biótico, meio físico e meio socioeconômico (LARA, 2018), que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Impactos causados pela instalação de usinas fotovoltaicas de médio e grande porte.

Meio	Impactos
Biótico	Várias alterações no comportamento e na composição da fauna local O desgaste do solo devido à preparação do solo Danos ao processo de reprodução animal Remoção da cobertura vegetal nativa Perda de fontes de alimentação Perda do habitat natural Algumas mudança nos padrões de movimentação dos animais Migração forçada devido à escassez de alimento Destruição/Eliminação da microfauna local Acidentes com animais devido a destruição dos seus abrigos
Físico	Alterações ou degradações da paisagem, dependendo do porte e da localização do empreendimento Geração de resíduos sólidos nas fases de obra Contaminação do solo pelas atividades do canteiro de obras Alterações no fluxo hidrológico superficial devido ao desgaste do solo Risco de erosão do solo Alterações na qualidade do ar devido à emissão de gases e poeira Emissão de poluentes atmosféricos por veículos e máquinas em circulação
Socioeconômico	Geração de ruídos e vibrações devido ao transporte de veículos pesados Aumento do fluxo de veículos nas vias locais Transtornos às comunidades próximas, como poeira, emissão de gases e ruídos Deterioração da infraestrutura viária da região Ocorrência de acidentes com pessoas e animais Afastamento de animais de seu habitat natural devido à movimentação e perturbações

Fonte: elaborada pelo autor.

2.3.3 Impactos ambientais do descarte do módulo fotovoltaico

Em primeiro lugar, é importante lembrar que os módulos fotovoltaicos possuem, em média, uma vida útil de 25 a 30 anos, mantendo até 80% (ou mais) de sua eficiência durante esse período. Após esse tempo, a eficiência tende a diminuir consideravelmente, e o módulo passa a ser considerado em fim de vida útil (PRADO; ESPINOSA, 2018).

No entanto, estima-se que, em um futuro próximo, o mundo acumulará milhares de toneladas de resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos desativados. Caso esses resíduos não sejam descartados adequadamente, poderão causar diversos impactos negativos ao meio ambiente e sérios riscos à saúde humana. Entre os problemas relacionados ao descarte inadequado estão a lixiviação de metais pesados, como o cádmio e o chumbo, ambos altamente tóxicos. Além disso, há o desperdício de materiais valiosos, como alumínio, vidro e metais raros, incluindo germânio, índio, gálio e prata (COSTA *et al.*, 2024).

Segundo Finge (2019), a avaliação dos módulos fotovoltaicos considera todos os materiais que os compõem, pois é com base neles que se determinam os possíveis impactos ambientais e à saúde humana ao final da vida útil do equipamento. A partir dessa análise, órgãos

governamentais podem estabelecer as melhores estratégias para o tratamento e descarte final dos resíduos, de forma a mitigar consequências ambientais e sanitárias.

A Tabela 3 apresenta os principais impactos associados à presença de cádmio e chumbo, quando os módulos são descartados de forma incorreta (OLIVEIRA, 2021).

Tabela 3 – Impactos socioambientais do chumbo e do cádmio

Elemento	Danos ao meio ambiente	Danos à saúde humana
Chumbo	Ecossistemas próximos a fontes de chumbo demonstram uma série de efeitos adversos incluindo perdas na biodiversidade, diminuição das taxas de crescimento e reprodução em plantas e animais	A exposição intensa e muito demorada, poderá gerar insuficiência renal e vai crescendo ao ponto de se tornar irreversível e consequentemente os rins perdem a capacidade de executarem suas funções básicas o que poderá levar a hipertensão
Cádmio	Toxicidade ao meio ambiente, acumulação na cadeia trófica	Elemento cancerígeno, pode causar sérias alterações fisiopatológicas sob condições de exposição repetida.

Fonte: elaborada pelo autor.

Xu *et al.* (2018) destaca que, embora cádmio e chumbo representem apenas cerca de 1% da composição total dos módulos fotovoltaicos, são justamente esses metais os responsáveis pelos impactos ambientais e à saúde humana mais severos, em comparação com os demais componentes.

O chumbo, por exemplo, se distribui por todo o corpo, afetando principalmente o sangue. Acumula-se nos ossos e pode causar sérios danos aos sistemas nervoso, reprodutor, imunológico e cardiovascular. Estima-se que um módulo fotovoltaico contenha aproximadamente 12,67 g de chumbo, dos quais entre 1,64 g e 11,4 g podem ser lixiviados no ambiente, o que reforça seu alto potencial de periculosidade (COELHO; SERRA, 2018).

Já o cádmio está presente nos módulos em quantidades aproximadas de 4,6 g por unidade, com potencial de lixiviação variando entre 0,32 g e 3,84 g. Trata-se de um elemento extremamente tóxico, com meia-vida biológica de até 30 anos (COELHO; SERRA, 2018). Segundo Kiminosono (2020), a exposição ao cádmio pode causar fibrose pulmonar — uma doença pulmonar crônica e progressiva, caracterizada pelo espessamento dos alvéolos, o que compromete a transferência de oxigênio para o sangue. Essa condição resulta em dificuldades respiratórias crescentes. Embora seja uma doença sem cura definitiva, o tratamento adequado pode ajudar a controlar os sintomas e retardar sua progressão.

O alumínio, amplamente utilizado na moldura dos módulos fotovoltaicos, também pode gerar impactos ambientais significativos ao final da vida útil do equipamento. Quando

descartado em aterros sanitários, sua decomposição pode levar de 200 a 500 anos. No entanto, sua reciclagem é altamente eficiente e pode reduzir substancialmente esses impactos. O descarte inadequado pode causar poluição do solo e da água, afetando tanto ecossistemas terrestres quanto aquáticos. Além disso, em determinadas condições, a poeira de alumínio pode ser inflamável e explosiva, representando riscos de incêndios e explosões. Em altas concentrações no organismo humano, o alumínio está associado a doenças ósseas e problemas renais (ALAGO, 2024).

O *backsheet* e o EVA (encapsulante) utilizados na fabricação de módulos fotovoltaicos são compostos por diversas camadas de polímeros, incluindo plásticos que contêm flúor em sua composição química. A queima ou o descarte inadequado desses materiais pode resultar na liberação de gases tóxicos, como monóxido de carbono, dioxinas, ácido fluorídrico e compostos voláteis. Esses gases representam riscos significativos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana (CUCCHIELLA *et al.*, 2015).

Segundo Oliveira (2021), ao final de sua vida útil, os módulos fotovoltaicos são classificados como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos). Essa classificação se deve ao elevado potencial de contaminação do solo, decorrente da presença de materiais tóxicos que podem ser liberados no meio ambiente, caso não sejam devidamente tratados. Por isso, é essencial que esses materiais sejam separados dos resíduos sólidos comuns e descartados de forma adequada.

Na ausência de um processo de reciclagem apropriado, os módulos descartados devem ser classificados e tratados como resíduos industriais perigosos, não podendo ser eliminados como resíduos sólidos urbanos. Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de desenvolver e aprimorar tecnologias e procedimentos para a reciclagem desses materiais ao final de sua vida útil (BETTANIN, 2017).

2.4 Gestão do fim de vida útil do módulo fotovoltaico

Segundo Hahn (2024), o descarte de módulos fotovoltaicos se tornará uma questão cada vez mais relevante nos próximos anos. A gestão do fim da vida útil desses módulos será essencial para proteger o meio ambiente e a saúde humana dos impactos negativos decorrentes da liberação descontrolada dos materiais presentes em sua composição.

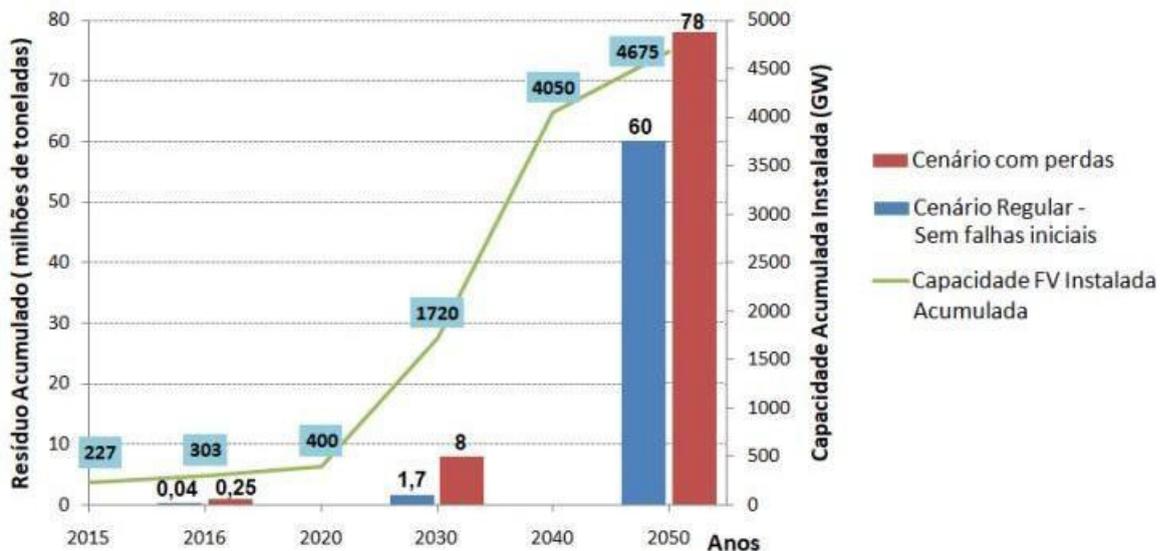
Com o crescimento acelerado do uso de sistemas fotovoltaicos, é esperado que o volume de módulos em fim de operação também aumente significativamente. Apesar da expectativa de vida útil de 25 a 30 anos, Jones (2024) ressalta que é um equívoco presumir que os

resíduos começarão a surgir apenas após esse período. Estima-se que mais de 7% dos módulos são descartados de forma prematura, antes de completarem 15 anos de uso, devido a diversos fatores, como falhas na instalação e manutenção, além de danos ocorridos durante o transporte, carregamento e descarregamento.

As primeiras instalações fotovoltaicas começaram a ser implementadas por volta da década de 1990, especialmente em países europeus como a Alemanha. Portanto, já é possível considerar que uma quantidade significativa de módulos instalados nesses países se tornou obsoleta e foi descartada (MIRANDA *et al.*, 2019).

Um relatório elaborado pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), em parceria com o Programa de Sistemas Fotovoltaicos da Agência Internacional de Energia (IEA-PVPS), apresenta um gráfico com a projeção do volume global de resíduos fotovoltaicos entre os anos de 2016 e 2050, considerando uma vida útil média de 30 anos (CRUZ, 2016). Esse gráfico pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Visão geral das projeções globais de resíduos de módulo fotovoltaico.



Fonte: (MIRANDA *et al.*, 2019)

Na Figura 9, observa-se a estimativa do volume global de descarte de módulos fotovoltaicos, em toneladas, de 2016 a 2050. No cenário base — que considera o descarte apenas ao final da vida útil dos módulos — o volume acumulado era de cerca de 43.500 toneladas em 2016. A projeção aponta um crescimento para 1,7 milhão de toneladas em 2030, chegando a 60 milhões de toneladas até 2050. Já no cenário que considera perdas prematuras (como falhas técnicas antes do término da vida útil), a estimativa sobe para 250.000 toneladas em 2016, 8

milhões de toneladas em 2030 e aproximadamente 78 milhões de toneladas em 2050. A Figura evidencia um aumento significativo até 2030, período em que se espera o descomissionamento de um número crescente de sistemas fotovoltaicos, seguido por um crescimento ainda mais expressivo até 2050, impulsionado pelo aumento da capacidade instalada global (MIRANDA *et al.*, 2019).

Diante dessas projeções, torna-se evidente a importância de discutir e implementar uma gestão eficiente para o fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos. Considerá-los apenas como resíduos inúteis a serem descartados é um erro, uma vez que esses módulos ainda apresentam potencial de reaproveitamento e reciclagem (CHOI; FTHENAKIS, 2014).

A gestão dos resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos exigirá a adoção de regulamentações específicas e eficazes. Será necessária também a expansão da infraestrutura de tratamento de resíduos existente, de modo a incluir o manejo adequado desses equipamentos ao final de sua vida útil, promovendo a inovação contínua na área de gestão de resíduos (CRUZ, 2016).

2.5 Soluções para reduzir os impactos ambientais

2.5.1 Logística reversa aplicada aos módulos fotovoltaicos

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que é uma política que faz a regulamentação da gestão de resíduos sólidos no Brasil, define a logística reversa como um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta, o transporte, o tratamento e a reciclagem dos resíduos sólidos, com o objetivo de reinseri-los no ciclo produtivo ou garantir seu descarte final de forma ambientalmente adequada, minimizando os impactos negativos ao meio ambiente (SUNR, 2025).

No contexto da energia solar, a logística reversa desempenha um papel fundamental ao possibilitar o retorno dos módulos fotovoltaicos à cadeia produtiva. Dessa forma, os módulos que atingiram o fim de sua vida útil podem ser reaproveitados. A valorização desses resíduos contribui para a redução da poluição dos ecossistemas, aumenta a vida útil dos aterros sanitários, minimiza os impactos ambientais e fortalece a recuperação de materiais valiosos (GHIZONI, 2016).

Além de agregar valor ao produto, a implementação de sistemas de logística reversa também promove a geração de empregos e renda em diferentes etapas da cadeia produtiva.

Ademais, o processo pode trazer benefícios econômicos significativos para os fabricantes de módulos fotovoltaicos, pois o reaproveitamento de materiais transforma resíduos em novas matérias-primas, reduzindo os custos de produção e, conseqüentemente, o preço dos produtos finais (GHIZONI, 2016).

A Figura 10 apresenta os principais estágios da logística reversa aplicada aos módulos fotovoltaicos, desde a coleta até a reintrodução ao mercado (GHIZONI, 2016; SILVA; VARELLA, 2024; LACERDA, 2011).

Figura 10 – Logística reversa do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (GHIZONI, 2016; SILVA; VARELLA, 2024; LACERDA, 2011)

A coleta ocorre logo após o término do ciclo de vida útil dos módulos, sendo realizada por distribuidoras, fabricantes e empresas especializadas, que retiram os equipamentos das áreas em que foram instalados. Em seguida, os módulos são transportados para centros de processamento, onde são cuidadosamente desmontados, dada a presença de materiais como vidro, metais e semicondutores que precisam ser separados adequadamente.

Os materiais recuperados seguem então para etapas específicas de reciclagem: o vidro, por exemplo, pode ser refinado e reutilizado na fabricação de novos módulos; metais como alumínio e cobre são fundidos e reaproveitados em diversos produtos; e o silício, uma

vez purificado, também pode ser reintegrado à cadeia produtiva. Todos os materiais que não puderem ser reutilizados ou reciclados devem ser descartados de maneira segura, a fim de evitar riscos de contaminação e danos ao meio ambiente.

Por fim, ocorre a reintrodução ao mercado: os materiais reciclados retornam como insumos na produção de novos módulos fotovoltaicos ou em outros produtos industriais. Essa prática contribui significativamente para a economia de recursos naturais, uma vez que a reciclagem consome menos energia do que a produção de materiais primários (GHIZONI, 2016; SILVA; VARELLA, 2024; LACERDA, 2011). Quando a reutilização não é viável, deve-se recorrer à disposição final ambientalmente adequada, conforme determina a legislação vigente (LACERDA, 2011).

Lacerda (2011) afirma que, por trás da logística reversa, está o conceito do ciclo de vida do produto, pois, sob a ótica logística, a vida útil de um produto não se encerra com sua entrega ao consumidor final. Produtos obsoletos, com defeitos ou mau funcionamento, devem retornar à origem para serem adequadamente reciclados ou descartados de forma ambientalmente correta.

Segundo SUNR (2025), considerada a primeira empresa de reciclagem fotovoltaica da América Latina, existem cerca de cinco benefícios principais associados à logística reversa de módulos fotovoltaicos, os quais estão representados na Figura 11.

A logística reversa dos módulos fotovoltaicos traz uma série de benefícios relevantes. Em primeiro lugar, ela contribui diretamente para a preservação ambiental, uma vez que o reaproveitamento e a reciclagem dos módulos reduzem significativamente a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários.

Outro ponto importante é a conformidade legal. A logística reversa é um dos pilares da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que exige uma gestão adequada de resíduos eletroeletrônicos, como os módulos fotovoltaicos, por todos os envolvidos na cadeia produtiva. A adoção dessa prática ajuda a evitar penalidades legais e assegura o cumprimento das regulamentações ambientais.

No aspecto produtivo, a logística reversa fortalece o conceito de economia circular. Materiais como alumínio, vidro e metais preciosos recuperados dos módulos são reinseridos no processo de fabricação de novos produtos. Essa reutilização reduz a necessidade de extração de novas matérias-primas, preservando os recursos naturais e promovendo um ciclo produtivo mais sustentável.

Figura 11 – Benefícios da logística reversa do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (GHIZONI, 2016; SILVA; VARELLA, 2024; LACERDA, 2011)

Além disso, a prática contribui para o fortalecimento da reputação das empresas, demonstrando compromisso com a sustentabilidade e a inovação. Isso tende a atrair consumidores e parceiros alinhados com valores ambientais.

Por fim, a logística reversa impulsiona o desenvolvimento econômico local, não apenas por reduzir custos e impactos ambientais, mas também por gerar oportunidades econômicas por meio da comercialização de componentes reciclados, beneficiando diretamente as comunidades envolvidas (LEGADO, 2020).

2.5.2 Reciclagem do módulo fotovoltaico

Ao final da vida útil de um material, existem duas rotas principais que podem ser adotadas: o descarte ou a reciclagem. A reciclagem é uma prática essencial no contexto da sustentabilidade ambiental, pois permite que produtos já utilizados (resíduos) sejam convertidos em matéria-prima para a fabricação de novos produtos, evitando, assim, o acúmulo de lixo e a exploração excessiva de recursos naturais (OLIVEIRA, 2021).

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos tem como principal objetivo reduzir a quantidade de materiais descartados em aterros sanitários e promover o reaproveitamento desses materiais na produção de novos módulos (AZEVEDO, 2024).

A Figura 12 ilustra os princípios clássicos da gestão de resíduos que podem ser aplicados aos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil. Esses princípios são conhecidos como os 4Rs: reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar (MIRANDA *et al.*, 2019). Eles representam estratégias fundamentais para minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado e promover um ciclo de vida mais sustentável para os produtos.

Figura 12 – Opções para gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (4Rs).



Fonte: (MIRANDA *et al.*, 2019)

Para os países que fabricam módulos fotovoltaicos, reduzir a quantidade de materiais utilizados na produção é considerado um dos principais focos. Essa prática contribui para a conservação de recursos naturais e, a longo prazo, reduz a geração de resíduos, promovendo benefícios ambientais significativos ao diminuir o desperdício de materiais (MIRANDA *et al.*, 2019; TONHOLI, 2021).

A segunda estratégia é a reutilização de componentes dos módulos fotovoltaicos. Isso envolve a análise da viabilidade de reparo dos defeitos apresentados. Caso seja possível realizar o conserto, os módulos podem ser revendidos. Aqueles que não puderem ser reutilizados são encaminhados para outras destinações, como o processo de reciclagem (MIRANDA *et al.*, 2019; TONHOLI, 2021).

A reciclagem é aplicada quando os módulos não podem mais ser reaproveitados (TONHOLI, 2021). Ao atingirem o fim de sua vida útil, uma parte significativa dos materiais que compõem os módulos pode ser recuperada. Estima-se que aproximadamente 90% (ou mais) dos principais componentes podem ser reciclados, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva (MIRANDA *et al.*, 2019).

A quarta estratégia envolve a recuperação de energia por meio do tratamento térmico dos resíduos dos módulos. Nesse processo, resíduos não perigosos são incinerados, e o calor

gerado pode ser convertido em energia elétrica. Essa prática contribui para o uso eficiente de recursos e reduz a dependência de fontes energéticas convencionais (MIRANDA *et al.*, 2019).

Atualmente, existem diversas tecnologias e abordagens para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Uma das técnicas é o processo térmico, que visa a separação física dos componentes dos módulos. Outras opções incluem o uso de laser ou tratamentos químicos, que permitem a purificação das células fotovoltaicas e a remoção da camada antirreflexo e das junções metálicas, geralmente compostas por cobre ou prata. Entre os métodos químicos utilizados, destacam-se a lixiviação e a pirólise, eficazes na remoção de componentes que não integram diretamente a célula fotovoltaica (PUPIN, 2019).

2.5.2.1 *Tecnologias aplicadas na reciclagem*

A tecnologia fotovoltaica aplicada ao processo de reciclagem precisa avançar em três aspectos considerados fundamentais: regulamentar, tecnológico e financeiro.

O aspecto regulamentar refere-se à necessidade de os órgãos governamentais estabelecerem e incentivarem normas claras para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, especialmente os mais antigos. É essencial que a legislação defina de forma objetiva as responsabilidades pela gestão dos resíduos, os procedimentos adequados a serem seguidos e as penalidades aplicáveis em caso de descumprimento das normas estabelecidas.

O aspecto tecnológico está relacionado ao desenvolvimento de pesquisas e à consolidação de bases científicas que sustentem os procedimentos mais eficientes e sustentáveis para a reciclagem dos materiais presentes nos módulos fotovoltaicos.

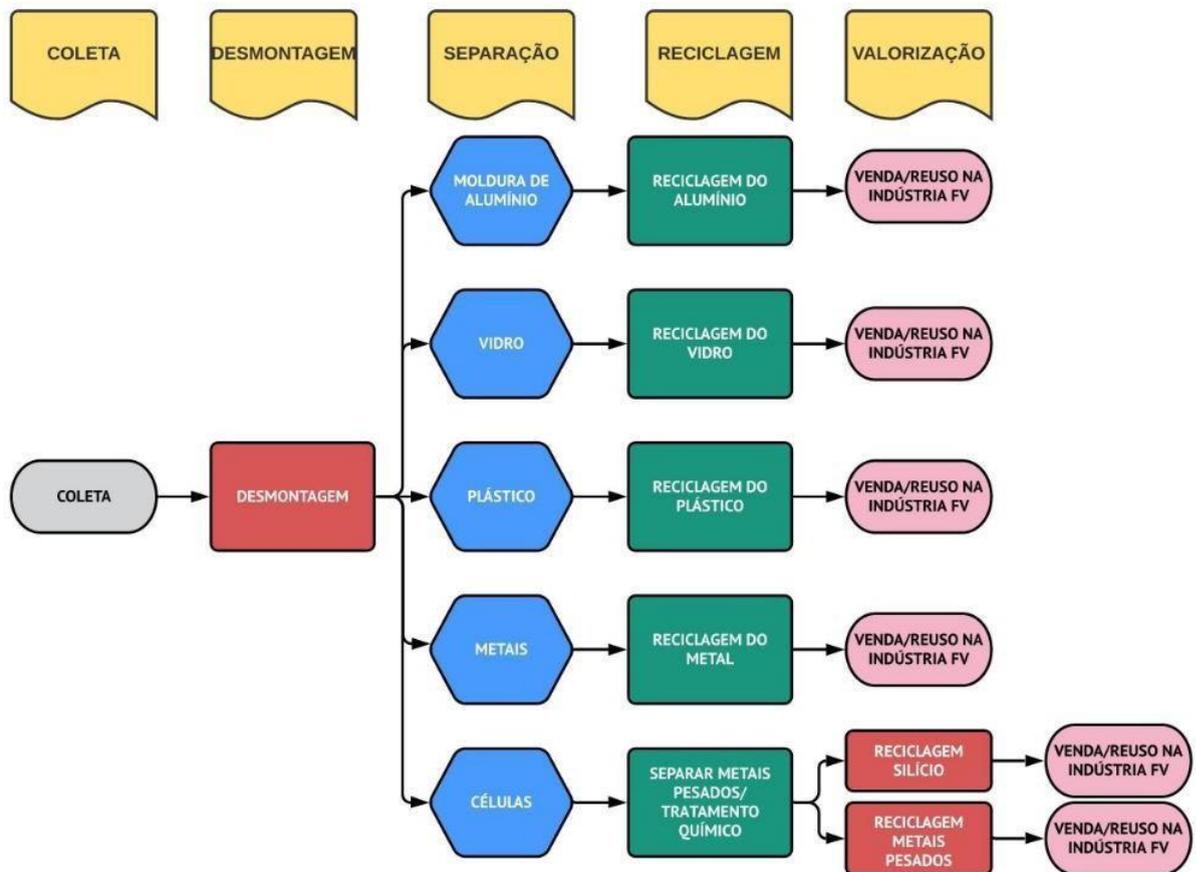
Por fim, o aspecto financeiro é fundamental para a viabilidade do mercado de reciclagem. São necessários investimentos para tornar o processo economicamente atrativo, tanto para empresas especializadas quanto para potenciais investidores. A criação de incentivos financeiros e modelos de negócios sustentáveis pode impulsionar o desenvolvimento desse setor (DINIZ, 2023).

Segundo Ghizoni (2016), a reciclagem é considerada a principal estratégia para a redução dos impactos ambientais associados aos módulos fotovoltaicos, pois contribui para a diminuição do consumo de matérias-primas no futuro e para a redução das emissões de gases de efeito estufa durante o processo de fabricação.

A Figura 13 apresenta as diversas etapas envolvidas no processo de reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Esse processo pode ser realizado por meio de métodos mecânicos,

químicos e térmicos.

Figura 13 – Processo de reciclagem do módulo solar fotovoltaico



Fonte: (SILVA; VARELLA, 2024)

O método mecânico é responsável pela trituração e separação do vidro. Já o método químico atua na separação de metais pesados, permitindo a recuperação das células fotovoltaicas. Por fim, o método térmico é utilizado para a remoção dos polímeros presentes nos módulos (SILVA; VARELLA, 2024).

A separação é considerada uma das etapas fundamentais no processo de reciclagem, sendo o momento em que os materiais provenientes da desmontagem dos módulos passam por uma triagem inicial. Em seguida, é realizada a remoção mecânica de componentes como a estrutura de alumínio, a caixa de junção e os conectores.

Após essa etapa, ocorre a remoção do vidro, e os materiais restantes são submetidos a processos de incineração e tratamento químico, com o objetivo de separar e recuperar os metais presentes.

Após as etapas de coleta e separação, os materiais são destinados a diferentes fins, sendo geralmente enviados para empresas especializadas em reciclagem e no processamento de

materiais puros. Essas empresas têm a responsabilidade de transformar os materiais coletados em matérias-primas com propriedades específicas, de modo a atender às exigências técnicas de diversos setores industriais (SILVA; VARELLA, 2024).

Ao final do processo de reciclagem, alguns materiais ou substâncias ainda podem ser reinseridos no ciclo produtivo, sendo possível que passem por novos ciclos de reciclagem após completarem novamente sua vida útil. Nesse contexto, a Tabela 4 apresenta o destino final de alguns componentes ao término do processo de reciclagem (GHIZONI, 2016).

Tabela 4 – Destino final de alguns componentes no final do processo de reciclagem

Componente	Destino final
Vidro	Indústria de vidro Indústria fotovoltaica Tinta para asfalto Construção (blocos e tijolos de vidro)
EVA	Reutilização na indústria química Sola de sapato Placas de isolamento acústico ou térmico
Alumínio	Indústria Automotiva (peças de motores) Indústria de embalagens (latas de bebidas) Produção de novos módulos FV.
Semicondutor	Wafer com eficiência para produção de células FV Reutilização na indústria FV Utilização como agregador para forno de função metalúrgica Reutilização em indústria eletrônicas

Fonte: Adaptado de (GHIZONI, 2016).

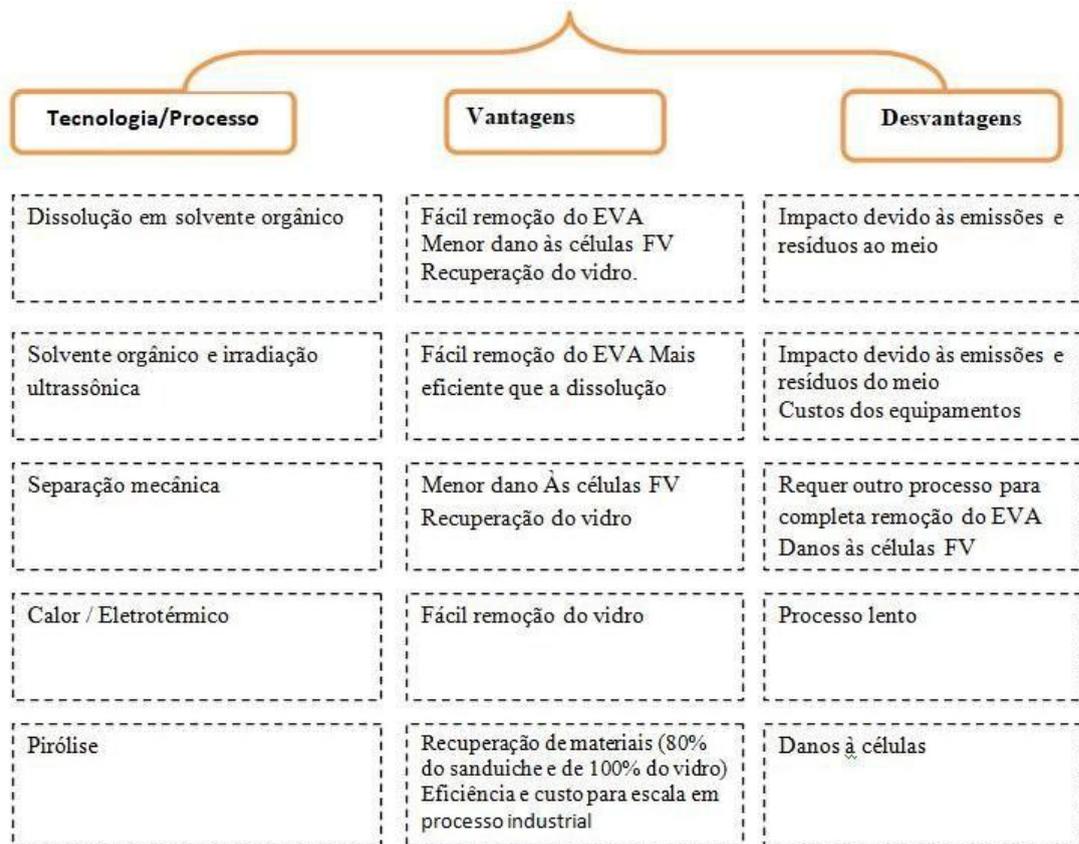
A busca por novas tecnologias de reciclagem e por processos integrados à logística reversa desperta cada vez mais interesse por parte das fábricas. Nesse contexto, Scolla (2020) apresenta, nas Figuras 14 e 15, um resumo dos principais métodos de reciclagem descritos na literatura.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos traz diversos benefícios relevantes. Conforme apresentado por SUNR (2025) na Figura 16, há vários motivos pelos quais a reciclagem desses módulos deve ser priorizada.

Um dos principais benefícios é a redução do impacto ambiental. Como os módulos contêm materiais como alumínio, silício e vidro, o descarte inadequado pode levar à liberação de substâncias tóxicas no solo e na água, provocando sérios danos ambientais.

Outro fator importante é o reaproveitamento de recursos. Materiais como vidro e alumínio podem ser recuperados durante o processo de reciclagem e utilizados na fabricação de

Figura 14 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de (SCOLLA, 2020)

novos produtos. Ao utilizar materiais reciclados, evita-se a extração de novos recursos naturais, contribuindo para o fortalecimento da economia circular e para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A reciclagem também é essencial para o atendimento às regulamentações ambientais. A gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos tornou-se uma exigência legal em diversos países. No Brasil, por exemplo, a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes para a gestão de resíduos e impõe às empresas a responsabilidade pelo destino final adequado dos materiais que produzem, sob risco de sanções e multas.

Além disso, a reciclagem contribui para o crescimento econômico e a geração de empregos. A partir de avanços tecnológicos, novas oportunidades de trabalho são criadas, especialmente em áreas qualificadas, impulsionando o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos mais sustentável e ambientalmente responsável no setor de energias renováveis.

A adoção em larga escala da reciclagem de módulos fotovoltaicos pode reduzir significativamente a estimativa de 78 milhões de toneladas de resíduos que se acumularão até

Figura 15 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura (continuação)

Tecnologia/Processo	Vantagens	Desvantagens
Dissolução em solvente (Ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduiche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta.	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio
Mecânico (seco e úmido)	Minimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de (SCOLLA, 2020)

2050. Caso 100% desses materiais sejam reinseridos na economia, o valor recuperado poderá ultrapassar 15 bilhões de dólares até esse mesmo ano (POWER, 2024).

2.5.3 Conscientização

É necessário conscientizar os consumidores sobre os possíveis impactos ambientais causados pela eliminação inadequada dos módulos fotovoltaicos, destacando que os benefícios da reciclagem são essenciais para a promoção de práticas sustentáveis na gestão de resíduos. Nesse sentido, governos, organizações não governamentais (ONGs) e representantes da indústria podem exercer um papel fundamental na sensibilização da sociedade, por meio da promoção de campanhas públicas, programas educativos e diretrizes claras sobre o descarte adequado dos módulos fotovoltaicos (ENERGY, 2023).

Figura 16 – Importância da reciclagem do módulo fotovoltaico



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de (SUNR, 2025)

2.5.4 Políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos existentes no mundo

De acordo com Cynthia *et al.* (2016), a reciclagem dos módulos fotovoltaicos continua sendo a principal estratégia estudada para mitigar os impactos ambientais causados pelo fim da vida útil desses equipamentos, sendo considerada o caminho mais provável a ser seguido nos próximos anos. No que diz respeito à reciclagem, tem-se como referência as diversas práticas regulamentadas pela União Europeia, pioneira na criação de diretrizes para o descarte e a reciclagem. Empresas envolvidas na produção e comercialização de módulos fotovoltaicos têm implementado ações de reciclagem com base em acordos de responsabilidade ambiental.

Na União Europeia, onde a geração de energia por meio de módulos fotovoltaicos já ocorre há mais tempo e muitos sistemas estão próximos do fim de sua vida útil, é exigido que pelo menos 75% dos materiais dos módulos sejam reciclados (ALENCAR, 2021).

Em 2012, os módulos solares foram oficialmente classificados como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) na Diretiva Europeia 2012/19/UE. Essa legislação impôs a responsabilidade pela logística reversa a fabricantes, fornecedores, importadores e revendedores, obrigando essas empresas a coletar e reciclar os módulos sempre que atingirem o fim de sua vida útil (AZEVEDO, 2024).

O Reino Unido foi o primeiro país a aplicar a Diretiva 2012/19 da União Europeia.

O gerenciamento dos resíduos provenientes dos módulos em fim de vida foi formalizado por meio da Lei n.º 3113, que entrou em vigor em 1º de janeiro de 2014. A legislação determina que todos os módulos fotovoltaicos comercializados no Reino Unido, sejam de produção nacional ou importados, devem possuir um plano de conformidade registrado. Os fabricantes são obrigados a fornecer informações detalhadas, incluindo o número e o tipo de módulos produzidos ou importados (FINGE, 2019).

Por outro lado, a China — atual líder mundial no setor de energia solar fotovoltaica — ainda não possui regulamentações específicas para a gestão de resíduos fotovoltaicos. Segundo (Y *et al.*,), o Instituto de Pesquisa em Ciências Ambientais da China tem desenvolvido estudos voltados à avaliação dos impactos ambientais da indústria fotovoltaica, incluindo os efeitos do reaproveitamento de componentes reciclados. No entanto, como a maioria dos módulos ainda não atingiu o fim de sua vida útil, os níveis de resíduos permanecem baixos, o que dificulta o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de diretrizes regulatórias.

Além da China, outros países com mercados de energia solar em expansão, como Índia e Coreia do Sul, também não contam com regras específicas que obriguem a coleta, recuperação ou reciclagem dos módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil (Y *et al.*,).

Nos Estados Unidos, igualmente, não há uma legislação federal específica voltada à disposição dos resíduos de módulos fotovoltaicos. Entretanto, a EPA (*Environmental Protection Agency*) realiza testes de toxicidade para avaliar os riscos ambientais. Caso os resíduos não atendam aos critérios estabelecidos, são classificados como perigosos para o meio ambiente e para a saúde humana. Esses testes analisam o potencial de contaminação decorrente da presença de metais pesados nos módulos (TONHOLI, 2021).

Ainda na Europa, destaca-se a legislação da Alemanha no que diz respeito à gestão de resíduos fotovoltaicos. O país implementa a Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, que inicialmente tratava da coleta e reciclagem desses dispositivos em geral, mas foi ampliada em 2015 para incluir os módulos fotovoltaicos. Essa legislação tem servido de modelo para outros países e espera-se que venha a se consolidar como um padrão global (DINIZ, 2023).

No Brasil, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sendo complementada pelo Decreto nº 10.240/2020, que incentiva a logística reversa dos REEE e define metas para evitar que esses resíduos sejam destinados a lixões. Conforme o artigo 33 da PNRS, fabricantes e importadores de módulos fotovoltaicos são responsáveis por garantir a coleta, o transporte e a destinação final ambientalmente ade-

quada desses materiais. Assim, todas as empresas que oferecem sistemas de geração solar aos consumidores devem assegurar o descarte correto dos módulos, preferencialmente por meio da reciclagem, visando à proteção da saúde pública e do meio ambiente (AZEVEDO, 2024).

3 METODOLOGIA

No presente trabalho, foi adotada uma abordagem qualitativa, baseada em uma revisão bibliográfica, complementada posteriormente por uma análise descritiva. A metodologia está resumida no fluxograma da Figura 17, o qual apresenta a divisão em três pontos principais que conduziram aos resultados e à conclusão final.

Figura 17 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor

A revisão bibliográfica consistiu em levantamento, coleta e análise de diversas fontes da literatura relacionadas aos impactos ambientais associados à produção e ao descarte de módulos fotovoltaicos. A partir dessa pesquisa, foi possível reunir um conjunto amplo e confiável de informações para embasar as argumentações, incluindo artigos científicos, relatórios técnicos, revistas especializadas, trabalhos de conclusão de curso com temáticas semelhantes, publicações de órgãos regulamentadores, legislações pertinentes e livros acadêmicos.

As fontes foram obtidas por meio de bases de dados confiáveis, como o Google Acadêmico, repositórios de artigos e monografias, livros acadêmicos, portais governamentais, organizações ambientais e sites especializados na área. Para a seleção do material, foram adotados critérios como: data de publicação (preferência por conteúdos dos últimos 18 anos), relevância temática (com foco na avaliação do ciclo de vida e nos impactos ambientais dos módulos fotovoltaicos) e abordagem de soluções práticas para mitigar tais impactos.

Após a seleção das referências, buscou-se compreender o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e sua importância na identificação e quantificação dos impactos ambientais. Em seguida, foi conduzido um estudo descritivo com foco nos módulos fotovoltaicos, utilizando os dados extraídos da literatura selecionada. Nessa etapa, realizou-se um levantamento sobre a vida útil dos materiais e os impactos ambientais associados, especialmente durante as fases de produção e descarte dos módulos.

A etapa final teve como objetivo identificar e analisar soluções viáveis para a mitigação dos impactos ambientais observados. A análise foi conduzida com base em critérios como: uso de materiais recicláveis na produção, implementação de logística reversa e processos de reciclagem, além de ações de conscientização e o papel das legislações pertinentes.

Por fim, foram examinadas práticas adotadas por países que já possuem regulamentações específicas voltadas ao descarte de módulos fotovoltaicos, com destaque para a União Europeia (UE), considerada pioneira nesse campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) demonstrou que existem diversos impactos ambientais significativos que devem ser considerados durante as etapas de produção e descarte dos módulos fotovoltaicos. Os maiores impactos ambientais ocorrem na fase inicial — a fase de manufatura, durante a qual são realizadas a produção e a montagem dos módulos. Nessa etapa, identificou-se uma elevada demanda energética, associada à extração e ao processamento de diversas matérias-primas, como cobre, alumínio e silício. Esse processo resulta na emissão de gases de efeito estufa, contribuindo diretamente para a poluição ambiental.

Além disso, destacam-se subprodutos tóxicos gerados durante a produção, como o ácido clorídrico e o pó de sílica, ambos com potencial de causar sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente, caso não sejam devidamente controlados. Após a manufatura, a etapa de descarte dos materiais presentes nos módulos é considerada a segunda mais prejudicial ao meio ambiente (KONZEN; PEREIRA, 2020); (PUPIN, 2019).

Diante disso, pode-se concluir que a forma mais eficaz de melhorar o desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos é por meio do investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento de sistemas de geração mais eficientes, com maior durabilidade, o que facilita uma gestão de fim de vida mais prática e sustentável (KONZEN; PEREIRA, 2020).

No que diz respeito especificamente aos impactos gerados durante a produção dos módulos, a Tabela 5 apresenta os impactos mais relevantes identificados na pesquisa.

Tabela 5 – Principais impactos ambientais na produção de módulos fotovoltaicos

Fator de Impacto	Descrição dos Impactos Ambientais
Extração de matérias-primas	Destruição de habitats, poluição da água e do solo, aumento de resíduos e tráfego de veículos pesados.
Consumo energético	Altas emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O), devido ao uso de fontes não renováveis.
Produção e purificação do silício	Emissão de pó de sílica, uso de ácidos tóxicos (HCl , HF), risco à saúde humana e alto consumo de energia.
Produção do vidro	Alteração de ecossistemas fluviais, emissões de CO_2 , CH_4 , N_2O .
Extração do alumínio e cobre	Geração de dióxido de carbono e PFCs, contaminação de solos e águas, perda de biodiversidade.

Fonte: elaborada pelo autor com base em SCOLLA (2020), PRANA (2024), (AIR, 2022) e ECYCLE (2023).

É importante destacar que os trabalhadores expostos constantemente ao pó de sílica têm de 2 a 3 vezes mais chances de desenvolver câncer de pulmão em comparação com a população em geral, além de outras doenças, como câncer de estômago, câncer de fígado, anemia hemolítica, entre outras (AIR, 2022).

Esses resultados mostram que, por mais limpa que seja a energia solar fotovoltaica, ela ainda possui impactos significativos em sua cadeia produtiva. Portanto, é fundamental investir em tecnologias mais sustentáveis.

No que diz respeito aos impactos na fase de descarte, assim que os módulos chegam ao final de sua vida útil, eles devem ser descartados de maneira adequada. Como foi mencionado nos capítulos anteriores, os impactos dessa etapa estão associados à lixiviação de cádmio e chumbo — metais pesados e altamente tóxicos, que têm o potencial de contaminar o meio ambiente e prejudicar a saúde humana.

A meia-vida do cádmio é de aproximadamente 30 anos. Quando acumulado no organismo humano, ele atua como um agente cancerígeno. O chumbo, uma vez absorvido, se distribui pelo sangue e por diversas partes do corpo, podendo se acumular nos ossos e causar efeitos negativos nos sistemas nervoso, cardiovascular e reprodutivo.

Diante disso, torna-se essencial investir na reciclagem dos módulos fotovoltaicos, visto que essa prática representa uma estratégia viável e necessária para a mitigação desses impactos. A reciclagem permite a recuperação eficiente dos materiais, possibilitando sua reintrodução no mercado ou até mesmo no ciclo produtivo para a fabricação de novos módulos.

Segundo a IRENA, estima-se que haverá cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos até o ano de 2050 (MIRANDA *et al.*, 2019). Diante dessa previsão, torna-se urgente refletir sobre o futuro da energia solar e os impactos que tais resíduos podem causar. Deve-se buscar soluções práticas para mitigar esses efeitos, como o uso de materiais recicláveis na produção dos módulos, além da promoção da conscientização e da educação ambiental entre produtores e consumidores de energia solar, destacando os benefícios da reciclagem. Esses pontos, se bem aplicados, tornam-se grandes aliados na redução dos impactos ambientais e no fortalecimento da economia circular.

Foram apresentadas algumas tecnologias e processos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, como os processos mecânicos e químicos. Segundo Ghizoni (2016), o processo mecânico tem como principal vantagem o baixo custo; no entanto, ele não permite a recuperação de materiais de alto valor, sendo necessário um processo complementar. Já o processo químico é

considerado o principal método para a recuperação de metais, tendo como principal vantagem a alta pureza dos materiais obtidos.

Ainda que existam alguns efeitos negativos associados aos métodos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos, esses processos continuam sendo eficazes e essenciais para o reaproveitamento adequado dos materiais (GHIZONI, 2016).

Um dos fatores importantes para viabilizar a reciclagem é a sua rentabilidade econômica. A questão financeira representa um dos principais obstáculos para a implementação da reciclagem de módulos fotovoltaicos. Segundo Scolla (2020), os custos dos processos de reciclagem são muito elevados e, em muitos casos, o descarte dos resíduos fotovoltaicos em aterros se mostra mais barato do que reciclá-los.

Com o passar dos anos, a preocupação com os componentes presentes nos módulos fotovoltaicos tornou-se mais abrangente. Atualmente, o principal interesse está na recuperação da maior quantidade possível de materiais presentes nos módulos. No início, a preocupação com a reciclagem era limitada, principalmente, à recuperação do semicondutor (silício) (OLIVEIRA, 2021).

Ainda de acordo com Oliveira (2021), estima-se que, em 2030, o valor dos materiais recuperados por meio da reciclagem e do tratamento dos módulos fotovoltaicos chegue a aproximadamente 450 milhões. Esse valor equivale ao custo da matéria-prima necessária atualmente para a produção de cerca de 60 milhões de novos módulos fotovoltaicos. Em termos percentuais, o vidro representa a maior proporção nos módulos fotovoltaicos em comparação com os demais materiais. Seu preço médio no mercado está entre 30 e 50 dólares por tonelada, enquanto o valor recuperado da reciclagem pode alcançar 28 milhões, considerando a estimativa de 960.000 toneladas de vidro acumuladas até 2030.

Mantendo essa proporção, estima-se que a reciclagem permitirá a recuperação de cerca de 75.000 toneladas de alumínio e 7.000 toneladas de cobre. Ao final do processo, a combinação desses dois materiais poderá alcançar um valor de até 140 milhões de dólares Oliveira (2021).

Scolla (2020) ressalta que, economicamente, a reciclagem de módulos de primeira geração tem enfrentado diversos desafios, uma vez que o valor de venda de materiais como o cobre e o alumínio é relativamente baixo, quando comparado aos altos custos envolvidos no processo de reciclagem. Dessa forma, mesmo com um grande potencial de retorno financeiro, a viabilidade econômica da reciclagem ainda depende de avanços tecnológicos e de políticas

públicas de incentivo.

Com o aumento da eficiência dos módulos, tem-se observado uma redução na quantidade de silício utilizada em sua fabricação ao longo dos anos. A estimativa é que, até 2030, sejam produzidas 3.000 toneladas de silício a partir dos resíduos dos módulos fotovoltaicos. Quando recuperado, esse volume poderá gerar mais de 45 milhões de novos módulos, correspondendo a um valor estimado de aproximadamente 380 milhões de dólares. Para 2050, projeta-se um acúmulo de 78 milhões de módulos descartados, cuja reciclagem poderia resultar na produção de cerca de 2 bilhões de novos módulos fotovoltaicos Oliveira (2021).

No que se refere às políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, a Tabela 6 resume as principais políticas e ações adotadas em alguns países.

Tabela 6 – Políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos por país

País	Políticas e Ações Adotadas
União Europeia	Diretiva 2012/19/UE exige logística reversa e reciclagem mínima de 75% dos materiais dos módulos. É referência global em regulamentação ambiental no setor.
Reino Unido	Primeiro país a aplicar a diretiva europeia. Exige registro dos produtos, incluindo número e tipo de módulos, para prever o volume de resíduos.
Alemanha	Incluiu os módulos na Lei de Equipamentos Elétricos Eletrônicos desde 2015. Modelo legislativo usado como referência internacional.
Estados Unidos	Sem legislação federal específica. A EPA realiza testes de toxicidade e classifica resíduos como perigosos se necessário.
China	Sem legislação específica. Pesquisas estão em andamento, mas o baixo volume atual de resíduos limita o desenvolvimento de normas.
Índia e Coreia	Mercados em crescimento, porém ainda sem leis que exijam coleta ou reciclagem obrigatória dos módulos.
Brasil	Lei 12.305/2010 e Decreto 10.240/2020 estabelecem a logística reversa e obrigam fabricantes/importadores a garantir o descarte adequado.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Cynthia et al. (2016), Azevedo (2024), Diniz (2023), Tonholi (2021) e outros.

Por meio desta tabela, é possível observar que, enquanto alguns países têm se destacado e avançado com políticas estruturadas, outros ainda se encontram em situação de atraso. Caso esse cenário persista, a sustentabilidade da energia solar poderá ser comprometida. O incentivo à logística reversa, à reciclagem e à adoção de normas internacionais deve ser uma prioridade nos próximos anos, especialmente diante do crescimento estimado no volume de resíduos para o ano de 2050.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou, com base em revisão bibliográfica, uma análise dos impactos ambientais causados pela produção e pelo descarte de módulos fotovoltaicos.

Embora a energia solar seja amplamente reconhecida como uma fonte renovável e limpa, ela também impõe desafios ambientais relevantes, especialmente relacionados ao ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos. A partir da literatura consultada, foi possível examinar as etapas de produção e descarte, identificando os principais impactos ambientais e avaliando as possíveis soluções para mitigá-los.

Verificou-se que a fabricação dos módulos demanda um consumo significativo de recursos naturais, enquanto o descarte inadequado ao final de sua vida útil pode causar contaminação ambiental e riscos à saúde humana, em virtude da presença de materiais tóxicos, como chumbo e cádmio. Apesar de a reciclagem ser uma alternativa fundamental para a redução desses impactos, ela ainda enfrenta barreiras técnicas, econômicas e logísticas.

Neste contexto, foram apontadas algumas estratégias viáveis para a mitigação dos impactos, como a implementação de sistemas de logística reversa, o uso de materiais recicláveis na fabricação dos módulos e o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas para o processo de reciclagem. O trabalho também reforça a importância da criação e do fortalecimento de regulamentações e políticas públicas específicas — a exemplo das adotadas na União Europeia e no Brasil —, com o objetivo de promover práticas sustentáveis e fomentar a economia circular no setor de energia solar fotovoltaica.

Conclui-se, portanto, que a sustentabilidade da energia solar exige esforços contínuos e integrados entre empresas, governos e consumidores, bem como o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que conciliem eficiência energética e preservação ambiental. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se mostra uma ferramenta essencial para orientar melhorias contínuas e consolidar a energia solar como um pilar de um futuro energético mais limpo, sustentável e responsável.

Por fim, com o intuito de ampliar os resultados deste trabalho em estudos futuros, recomenda-se: o aprimoramento das tecnologias de produção, o avanço em métodos de reciclagem, a busca por fontes alternativas para a obtenção de silício e o monitoramento constante do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar**. 2024. <https://www.absolar.org.br/blog-absolar/3/>. Acessado em: 2024-10-05.
- AGENCY, I. E. **Photovoltaic Power Systems Programme Task 12 Sustainability of PV Systems**. 2023. Acessado em: 01-05-2025. Disponível em: <https://iea-pvps.org/research-tasks/task-12-sustainability-of-pv-systems/>.
- AIR, S. **Proteção Respiratória**. 2022. <https://supremaair.com.br/protecao-respiratoria/epi-para-po-de-silica/>. Acessado em: 2024-10-04.
- ALAGO, I. **Riscos do alumínio: como manter a segurança do trabalho e a saúde**. 2024. <https://www.chemicalrisk.com.br/riscos-do-aluminio/>. Acessado em: 2024-10-09.
- ALENCAR, A. A. **Reciclagem de painéis solares**. 2021. <https://ibdn.org.br/reciclagem-de-paineis-solares/>. Acessado em: 2024-10-11.
- ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M. Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. Universidade FUMEC, 2015.
- AZEVEDO, J. **Reciclagem de painel solar: como é feita?** 2024. <https://www.ecycle.com.br/reciclagem-de-painel-solar/>. Acessado em: 2024-10-11.
- BETTANIN, A. **O uso de tiossulfato para a recuperação de prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. 74 p. Monografia (Engenharia de Materias) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia de Materiais., Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/169297>.
- CHOI, J.-K.; FTHENAKIS, V. Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 443–449, 2014. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613007865>.
- COELHO, T. F.; SERRA, J. C. V. Tecnologias para reciclagem de sistemas fotovoltaicos: Impactos ambientais. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 15, 2018.
- COLTRO, L.; MOURAD, A.; GARCIA, E.; QUEIROZ, G.; GATTI, J.; JAIME, S. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. **Campinas Cetea Ital**, v. 1, 2007.
- COSTA, H. R. S.; CAMARGO, P. L. T. d.; ALVES, F. d. S. Impactos ambientais causados pelo ciclo de vida de painéis fotovoltaicos. **ForScience**, v. 11, n. 1, p. e01210, ago. 2024. Disponível em: <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscience/article/view/1210>.
- CRUZ, R. S. **Paneles solares PV en desuso: desafíos y oportunidades**. 2016. <https://ingenierosantacruz.wordpress.com/2016/06/21/paneles-solares-pv-en-desuso-desafios-y-oportunidades/>. Acessado em: 2024-10-09.
- CUCCHIELLA, F.; DÁDAMO, I.; ROSA, P. End of life of used photovoltaic modules a financial analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 552–561, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002294.

CYNTHIA, L.; L, M.; G, B.; F, A.; D, P. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. **JRC Publications Repository**, Luxembourg (Luxembourg), n. LB-NA-27797-EN-N, 2016. ISSN 1831-9424. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783>.

DINIZ, M. A. P. **Descarte de Painéis Solares no Contexto de Consolidação do Mercado Fotovoltaico Brasileiro e Mundial**. 47 p. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

ECYCLE. **Impactos ambientais do alumínio e suas propriedades**. 2023. <https://www.ecycle.com.br/aluminio/>. Acessado em: 2024-10-05.

ENERGIA, A. **Importância da energia solar: entenda aqui**. 2023. <https://origoenergia.com.br/blog/energia/importancia-da-energia-solar>. Acessado em: 2024-10-11.

ENERGY, E. **Solar lidera a revolução energética global e impulsiona metas de sustentabilidade**. 2024. <https://eletronenergy.com.br/blog/solar-lidera-a-revolucao-energetica-global-e-impulsiona-metas-de-sustentabilidade/>. Acessado em: 2024-10-11.

ENERGY, M. **Gestão de resíduos de energia solar: um futuro sustentável**. 2023. Acessado em: 2024-11-12.

FINGE, D. N. **IMPACTOS AMBIENTAIS E POSSIBILIDADES DE RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. 92 p. Monografia (CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PATO BRANCO, 2019. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/29479/1/PB_COELT_2019_2_07.pdf.

FREIRE, F. **Destinchando a placa solar fotovoltaica**. 2018. <https://www.shareenergy.com.br/destinchando-placa-solar-fotovoltaica/>. Acessado em: 2024-10-27.

GHIZONI, J. P. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ESTUDO SOBRE RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA PARA O BRASIL**. 77 p. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Fortaleza, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/176163>.

GRECO, V. **Qual é a origem da energia solar? Conheça a história no Brasil e no mundo**. 2023. <https://solucoes.edp.com.br/blog/origem-da-energia-solar/>. Acessado em: 2024-10-11.

GREEN. **The Environmental Impact of Solar Panel Production**. 2024. <https://green.org/2024/01/30/the-environmental-impact-of-solar-panel-production/>. Acessado em: 2024-10-03.

GóES, P. F.; FILHO, C. L. de S.; SOUZA, D. de A. Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 8, p. 201–213, 7 2023. An optional note.

HAHN, D. A. **Impactos Ambientais da Energia Fotovoltaica**. 2024. <https://blog.tabenergia.com.br/blog/impactos-ambientais-energia-fotovoltaica>. Acessado em: 2024-10-29.

- IBICT. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**. 2024. <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acessado em: 2024-10-29.
- INSPIRA, E. B. **Durabilidade do painel solar**. 2023. <https://www.bv.com.br/bv-inspira/financiamento-para-energia-solar/durabilidade-painel-solar>. Acessado em: 2024-10-26.
- IRENA. **Renewable Energy and Jobs Annual Review 2024**. 2016. Acessado em: 2024-10-26.
- IRENA. **international renewable energy agency**. 2024. <https://www.irena.org/>. Acessado em: 2024-10-05.
- JONES, F. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. **PES-QUISA FAPESP 330**, 2024. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-destino-dos-paineis-solares-ao-fim-da-vida-util/>.
- KIMINOSONO, A. N. **O acesso ao tratamento da fibrose pulmonar idiopática e a sustentabilidade da política de doença rara no estado do Pará**. 125 p. Monografia (Dissertação (Mestrado em Assistência Farmacêutica)) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.
- KONZEN, B. A. D. V.; PEREIRA, A. F. Ciclo de vida de painel fotovoltaico em cenário brasileiro. **UFMG**, Encontros Universitários, v. 1, p. 1, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/45698>.
- LACERDA, L. Logística reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. 2011. Acessado em: 01-05-2025. Disponível em: <https://www.ecodesenvolvimento.org/biblioteca/artigos/logistica-reversa-uma-visao-sobre-os-conceitos>.
- LARA, S. dos S. **A abordagem da avaliação do ciclo de vida aplicados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede no município de Cacoal e Pimenta Bueno - RO**. 83 p. Monografia (Engenharia de Produção) – Fundação Universidade Federal de Rondônia, P Cacoal – RO, 2018. Disponível em: <http://www.ri.unir.br/jspui/handle/123456789/2368>.
- LEGADO. **Logística Reversa e seus benefícios**. 2020. Acessado em: 2024-11-13.
- MACHADO, G. B. **COMO É FEITA A RECICLAGEM DE VIDRO**. 2024. <https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-vidro/>. Acessado em: 2024-10-05.
- MARTINS, C. **Saiba o que fazer com o seu resíduo de vidro**. 2020. <https://encurtador.com.br/hkHRC>. Acessado em: 2024-10-05.
- MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. D. S.; SILVA, T. C. Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos1. **Revista Brasileira de Energias RENOVÁVEIS**, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/53355>.
- MORAES, C. **Célula Fotovoltaica: Tudo que voce precisa saber**. 2020. <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acessado em: 2024-10-28.
- OLIVEIRA, E. V. de. **Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração**. 74 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65187>.
- PEREIRA; FILIPE. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. [S. l.: s. n.], 2011. Acessado em: 2025-01-20. ISBN 9789897230820.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [S. l.: s. n.], 2014. 530 p. Acessado em: 2025-04-05.

POWER, E. G. **Módulo Fotovoltaico**. 2024. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-solar/modulo-fotovoltaico>. Acessado em: 2024-10-26.

PRADO, P. F. d. A.; ESPINOSA, D. C. R. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2018.

PRANA. **Quais são os perigos da exposição ao pó de sílica para a saúde?** 2024. <https://blog.prana.tec.br/quais-sao-os-impactos-ambientais-da-energia-solar/>. Acessado em: 2024-10-03.

PUPIN, P. C. **Ciclo de vida de painéis fotovoltaicos: recuperação do vidro como alternativa ao descarte**. 124 p. Monografia (. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1939>.

SAFIRASOLAR. **Brasil assume 6º lugar em ranking mundial de energia solar**. 2024. <https://blog.safiraenergia.com.br/2024/04/15/brasil-assume-6o-lugar-em-ranking-mundial-de-energia-solar/>. Acessado em: 2024-10-05.

SCOLLA, M. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA: UMA ANÁLISE SOB A ÓTICA DE FATORES AMBIENTAIS**. 70 p. Monografia (Engenharia Elétrica) – UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, Ijuí, 2020.

SILVA, E. C. A. e; VARELLA, F. K. de O. M. **Logística reversa no setor fotovoltaico**. Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2024. Acessado em: 01-05-2025. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/9af4e9d7-1817-4598-9f6b-1d18e4ae7bc/full>.

SOLAR, H. E. **Entenda os benefícios a longo prazo do uso de energia solar!** 2022. <https://hccenergiasolar.com.br/entenda-os-beneficios-a-longo-prazo-do-uso-de-energia-solar/>. Acessado em: 2024-10-11.

SOLAR, P. **Passo a Passo da Fabricação do Pannel Solar**. 2024. <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>. Acessado em: 2024-10-28.

SOLAR, P. **Quem Criou a Energia Solar? História da Energia Solar**. 2024. Acessado em: 2024-10-11. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>.

SUNNE. **Conheça os Impactos da Energia Solar**. 2024. <https://sunne.com.br/saiba-os-impactos-ambientais-da-energia-solar/>. Acessado em: 2024-10-04.

SUNR. **Logística reversa de módulos fotovoltaicos**. 2025. Acessado em: 2025-04-24. Disponível em: <https://sunr.com.br/logistica-reversa-de-modulos-fotovoltaicos/>.

TONHOLI, F. **CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: RECUPERAÇÃO DO VIDRO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE**. 75 p. Monografia (Pós graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PATO BRANCO, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26281>.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, v. 75, p. 450–458, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300576>.

Y, X.; J, L.; Q, T.; AL, Y. C. P. **Global status of recycling waste solar panels: A review. Waste Manag.** Acessado em: 2024-11-11.

YABUTA, Y. F. **Impacto ambiental da fabricação de silício fotovoltaico.** 39 p. Monografia (CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA) – Universidade Federal de Campina Grande, Camina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18702>.