

PANORAMA E DESAFIOS DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Gabriel da Silva Sardinha
gabriel.sardinha56@gmail.com
IFF

Miguel Leonardo Terra
miguelterra98@gmail.com
IFF

Lucas Bastos Lopes
lucas.b.lopes@iff.edu.br
IFF

Resumo: A crise climática e a necessidade de uma transição energética justa fazem da energia solar uma das principais alternativas sustentáveis do século XXI. Contudo, o rápido crescimento do setor fotovoltaico levanta preocupações sobre a destinação dos resíduos gerados no fim da vida útil dos módulos, cuja quantidade pode alcançar entre 60 e 78 milhões de toneladas até 2050. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo analisar os principais desafios e a importância da reciclagem de módulos fotovoltaicos, utilizando uma revisão bibliográfica com abordagem exploratória e descritiva. Foram avaliados os processos de reciclagem existentes, discutidos os impactos ambientais associados ao descarte inadequado dos módulos, a viabilidade econômica do mercado de reciclagem e o potencial de crescimento desse setor no Brasil nas próximas décadas. Também foram analisadas as legislações e iniciativas tanto no cenário nacional quanto internacional, evidenciando que, para garantir a sustentabilidade da energia solar, é indispensável ampliar a infraestrutura de reciclagem, incentivar o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e criar políticas públicas que promovam a logística reversa e a gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos.

Palavras Chave: Reciclagem - Economia circular - Fim de vida útil - Módulo fotovoltaico - Gestão de Resíduos

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas induzidas por atividades humanas têm intensificado eventos extremos, afetando ecossistemas, economias e sociedades de forma global. Fenômenos como o aumento do nível do mar e a perda acelerada da biodiversidade já são considerados irreversíveis, o que reforça a urgência de ações mitigadoras. Nesse contexto, a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para fontes de energia sustentáveis se tornaram prioridades em diversas esferas da sociedade (Tolmasquim, 2025). A diversificação da matriz energética, com a substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, aparece como medida essencial para garantir a sustentabilidade da transição energética (Farrell et al., 2020).

A energia solar fotovoltaica, por sua natureza limpa e silenciosa, com longa vida útil e ausência de emissões durante a operação, tem se consolidado como um dos pilares mais promissores da transição energética. Segundo Farrell et al. (2020), entre as fontes renováveis, ela representa a maior capacidade de substituir os combustíveis fósseis. O crescimento dessa fonte no Brasil e no mundo é acelerado, impulsionado tanto pela evolução tecnológica quanto pela competitividade econômica. A Irena (2024) destaca a significativa redução de custos dos módulos e componentes dos sistemas, tornando-os mais acessíveis. No Brasil, os sistemas residenciais e comerciais registraram queda de 30% em seus custos em 2024 em relação ao ano anterior, com redução de 25% no tempo de retorno sobre o investimento (Greener, 2024).

Contudo, mesmo com sua alta durabilidade (cerca de 25 a 30 anos), os sistemas fotovoltaicos inevitavelmente se tornarão resíduos ao final de sua vida útil. O aumento expressivo na instalação desses sistemas nas últimas décadas projeta um volume proporcional de resíduos nos próximos anos. Estima-se que, até 2050, entre 60 e 78 milhões de toneladas de módulos se tornarão resíduos no mundo, somente no Brasil estima-se um volume entre 300 a 750 mil toneladas (Irena, 2016; Farrell et al., 2020). O descarte inadequado desses resíduos, como em aterros sanitários, pode gerar diversos problemas ambientais, como a lixiviação de materiais tóxicos.

A reciclagem surge, portanto, como uma alternativa sustentável para a gestão dos chamados “resíduos fotovoltaicos”. No entanto, conforme apontado por Bošnjaković et al. (2023), trata-se de um processo tecnicamente complexo e ainda economicamente inviável em muitas situações. A escassez crescente de recursos minerais utilizados na fabricação dos módulos torna a reciclagem ainda mais necessária, não apenas por seu potencial ambiental, mas também como estratégia para atender a própria demanda por insumos para a indústria fotovoltaica nas próximas décadas (Prado, 2018).

Diante desse cenário, este trabalho propõe uma abordagem holística sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos, com foco especial nos módulos à base de silício, predominantes no mercado. Seu objetivo geral é evidenciar a problemática dos resíduos sólidos gerados ao fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos, frente à tendência de crescimento da energia solar. Os objetivos específicos incluem demonstrar a importância da reciclagem para a indústria fotovoltaica, apresentar seus desafios técnicos e econômicos, bem como seu potencial de mercado, abordar os impactos ambientais do descarte e analisar o cenário no Brasil e no mundo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ESTRUTURA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células de silício, que podem ser monocristalinas ou policristalinas, interligadas para atingir a tensão e corrente desejadas (Zilles, 2010). Essas células são encapsuladas entre uma camada frontal de vidro temperado, que oferece proteção contra impactos e intempéries, e um backsheet de polímero, geralmente tedlar, que garante isolamento elétrico e proteção mecânica (Prado, 2018). Entre essas camadas, utiliza-se EVA como material adesivo e isolante, responsável por fixar as células e protegê-las contra umidade e danos, assegurando a durabilidade do módulo (Giongo, 2016). Sua estrutura básica é bem representada na Figura 1.

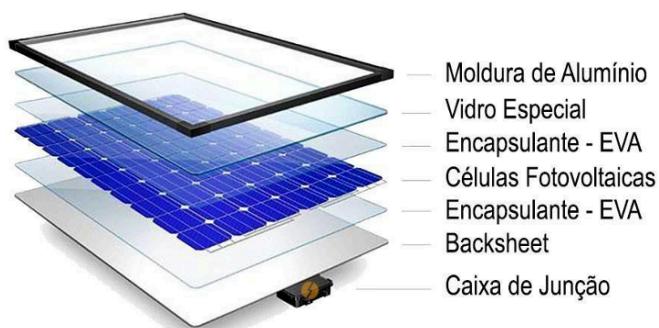


Figura 1: Estrutura de um módulo fotovoltaico

Fonte: Oliveira, 2021

2.2. ECONOMIA LINEAR E ECONOMIA CIRCULAR

Os módulos fotovoltaicos, ao final de sua vida útil, geralmente são tratados como lixo eletrônico e descartados em aterros sanitários ou incinerados, práticas comuns mas ambientalmente insustentáveis (Farrell et al., 2020). Esses métodos ignoram o reaproveitamento dos materiais e intensificam os impactos ambientais, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas por metais pesados como chumbo, estanho, índio e telureto de cádmio (Prado, 2018). A incineração, especialmente sem controle rigoroso, libera gases tóxicos e cancerígenos na atmosfera.

Esse modelo de descarte é característico da economia linear, que se baseia na lógica de extrair, produzir, consumir e descartar. Nesse sistema, os produtos são planejados para serem inutilizados após o uso, sem recuperação dos recursos empregados em sua fabricação. No caso dos módulos fotovoltaicos, isso resulta no desperdício de materiais altamente recicláveis, como o vidro (que representa cerca de 70% da massa do módulo) e o alumínio (cerca de 18%), além de metais preciosos como a prata e o índio (Farrell et al., 2020).

Em contrapartida, a economia circular propõe um modelo alternativo, no qual o valor dos produtos é mantido pelo maior tempo possível por meio do reuso, reparo, remanufatura e reciclagem. Essa abordagem transforma os resíduos em novos insumos para a cadeia produtiva, evitando a extração de novos recursos e reduzindo as emissões de carbono (Godoy, 2024). Para os módulos fotovoltaicos, isso significa reaproveitar metais valiosos e reduzir o consumo de energia na produção. Por exemplo, a energia para fabricar uma lâmina de silício é de aproximadamente 7,55 kWh, enquanto uma lâmina reciclada consome apenas 2,17 kWh (Farrell et al., 2020). Além disso, existe uma hierarquia de gestão de resíduos que deve ser seguida, conforme proposto por Dias (2015), priorizando a prevenção, seguida pelo reuso,

reciclagem, recuperação e, por fim, a disposição final. Essa lógica busca minimizar impactos ambientais e otimizar o uso dos recursos ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos.

2.2.1 PREVENÇÃO E DESIGN EFICIENTE

A prevenção envolve técnicas para reduzir a geração de resíduos ao fim da vida útil de um produto ou facilitar sua reinserção na cadeia produtiva, promovendo a economia circular. Segundo o Escritório de Tecnologias de Energia Solar dos EUA (Seto, 2022), é fundamental adotar medidas desde a fase de concepção dos módulos fotovoltaicos para minimizar impactos ambientais. Isso inclui substituir materiais tóxicos por alternativas sustentáveis, aumentar a durabilidade e eficiência dos módulos e tornar viável a separação de seus componentes para reuso e reciclagem.

Módulos com design ambientalmente amigável para o fim de sua vida útil podem reduzir os custos de processamento e descarte, embora apresentem custos iniciais mais altos devido à maior complexidade na desmontagem (Deng et al., 2019). Segundo Godoy (2024), a adoção eficaz dessas práticas na promoção da energia circular requer ampla colaboração entre governos, indústrias e a comunidade científica, visando o desenvolvimento de padrões e legislações adequadas.

2.2.2. REDUÇÃO

Com o avanço tecnológico em uma indústria em rápida expansão, espera-se que os módulos fotovoltaicos exijam cada vez menos matéria-prima. Embora os materiais utilizados não tenham mudado significativamente ao longo dos anos, os ganhos de eficiência permitiram consideráveis economias de material. Pesquisas têm buscado substituir ou reduzir a concentração de materiais tóxicos, e, no caso dos não tóxicos, minimizar sua quantidade por módulo para reduzir custos (Irena, 2016). Um exemplo é a deposição de prata, processo mais caro após a fabricação do silício, que levou fabricantes a adotarem as *busbars* — fitas metálicas de menor custo compostas geralmente por estanho e chumbo — como alternativa para baratear os módulos (Prado, 2018).

2.2.3. REUSO

Segundo Bošnjaković et al. (2023), o crescimento da energia fotovoltaica tem impulsionado um mercado secundário para componentes e materiais de módulos, permitindo sua reutilização ou recondicionamento mesmo após décadas de uso. Módulos de silício cristalino apresentam uma degradação anual de eficiência entre 0,56% e 2,96%, mas, como a alta eficiência nem sempre é necessária, a reutilização ainda é viável. Esse processo envolve limpeza, inspeção, reparos e testes, possibilitando o reaproveitamento em instituições como escolas e organizações sociais (Oliveira, 2021). Partes dos módulos também podem ser reaproveitadas em aplicações alternativas, como construção civil ou projetos educacionais.

A reciclagem demanda mais etapas de processamento do resíduo e oferece menor retorno financeiro, enquanto a reutilização é mais rentável e simples. Porém, o principal desafio da prática de reuso é estruturar um mercado amplo e sustentável para absorver o volume crescente de módulos desativados (Bošnjaković et al., 2023). Módulos reparados podem ser comercializados globalmente a preços reduzidos, e até mesmo módulos parcialmente restaurados ou componentes individuais têm demanda no mercado de segunda mão. Esse mercado secundário é particularmente interessante para países com recursos financeiros limitados que buscam ingressar no setor fotovoltaico (Irena, 2016).

2.2.4. RECUPERAÇÃO

Bošnjaković et al. (2023) apontam que há pouco interesse na reciclagem dos polímeros presentes nos módulos fotovoltaicos, como o encapsulante (EVA) e o *backsheet*, devido à complexidade e ao alto custo do processo. Farrel (2019), em um estudo pioneiro, avaliou o potencial de recuperação de energia desses materiais por meio da pirólise, método que permite convertê-los em energia, evita a oxidação química e facilita a separação das camadas do módulo. O valor calorífico do EVA obtido foi de cerca de 39,51 MJ/kg⁻¹, comparável ao do biodiesel e do gás natural, indicando um alto potencial energético. O autor conclui que a pirólise é uma alternativa tecnicamente viável para a recuperação energética dos resíduos poliméricos, podendo ainda contribuir como combustível no processo de reciclagem dos módulos ao fornecer calor para a separação dos materiais. No entanto, Deng et al. (2019) levantam preocupações quanto aos impactos ambientais desse método, especialmente no tratamento do *backsheet*.

2.2.5. RECICLAGEM

Segundo Dias (2015), a reciclagem pode ser definida como o “ato de fechar um ciclo de um material”, reaproveitando produtos descartados para transformá-los em matéria-prima para novas aplicações. Essa prática contribui para a redução de resíduos, a preservação de recursos naturais, a economia de energia e a diminuição da poluição ambiental. No contexto dos resíduos fotovoltaicos, Deng et al. (2019) ressaltam que os benefícios da reciclagem vão além das questões ambientais, englobando também ganhos econômicos e maior eficiência no uso de recursos. Ampliar as opções de reciclagem é essencial para construir uma economia circular e garantir a sustentabilidade da energia solar a longo prazo (Martins, 2024). A reciclagem adequada de módulos descomissionados pode ajudar a atender à crescente demanda por minerais escassos, reduzir a instabilidade de preços na cadeia produtiva, mitigar riscos geopolíticos e melhorar a segurança energética. Além disso, assumir a responsabilidade pelo fim de vida dos módulos agrega valor ambiental e corporativo aos fabricantes (Deng et al., 2019).

Atualmente, a indústria de reciclagem de módulos ainda está em fase inicial. Materiais como vidro, cobre e alumínio representam mais de 85% da massa de um módulo de silício cristalino (c-Si) e possuem processos de reciclagem consolidados, sendo o foco dos métodos mais simples (Irena, 2016). Já a reciclagem de alto valor busca recuperar componentes mais preciosos, como prata, silício e cobre das células solares, por meio de processos mais complexos (Deng et al., 2019).

O processo começa com a remoção da moldura de alumínio e da caixa de junção, seguida pela separação do vidro e dos plásticos das células. Em etapas posteriores, metais e silício podem ser recuperados individualmente, aumentando o valor dos materiais reutilizados e reduzindo o descarte de resíduos perigosos (Deng et al., 2019; Martins, 2024). Como o volume de resíduos ainda é relativamente pequeno, a reciclagem de vidro é, por enquanto, a alternativa mais viável economicamente. No entanto, a sustentabilidade de longo prazo exige o aprimoramento de técnicas que possibilitem a recuperação de materiais de alto valor (Deng et al., 2019). A produção de silício policristalino, amplamente utilizado em módulos fotovoltaicos, é extremamente intensiva em energia e matéria-prima. O silício recuperado pode ser reutilizado na fabricação de novos módulos, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ (Oliveira, 2021). Segundo Prado (2018), a reinserção do silício na cadeia produtiva pode reduzir o *payback* energético do módulo — tempo necessário para que a

energia gerada compense a energia e os impactos ambientais envolvidos na sua produção — em até quatro anos.

2.3. DEMANDA POR MATERIAIS CRÍTICOS

A produção de módulos fotovoltaicos requer uma variedade de materiais estratégicos, muitos dos quais considerados críticos devido à sua escassez, dificuldade de extração ou concentração geográfica (Prado, 2018; Schileo e Grancini, 2021). A crescente adoção da energia solar implica em uma pressão adicional sobre esses materiais, como prata, índio, telúrio, gálio e silício de grau solar. A prata, por exemplo, é usada em pastas condutoras nas células solares, mas sua participação representa apenas cerca de 0,05% do peso total de um módulo. No entanto, considerando as estimativas de resíduos até 2050 (entre 60 e 78 milhões de toneladas), estima-se um potencial de recuperação de 3 a 3,9 milhões de toneladas de prata (Farrell et al., 2020). Isso evidencia o impacto que uma cadeia de reciclagem eficiente pode ter na redução da demanda por mineração primária.

Além do impacto ambiental, a limitação na disponibilidade desses materiais pode se tornar um gargalo para a expansão sustentável da energia fotovoltaica. O uso da tecnologia fotovoltaica para atender à crescente demanda energética global implica na substituição da dependência por combustíveis fósseis pela necessidade de obtenção de minerais e materiais essenciais a essa tecnologia (Oliveira, 2021). A mineração possui uma série de impactos ambientais associados, como a emissão de poluentes e alto consumo energético, o que contraria a sustentabilidade advogada pela indústria fotovoltaica (Farrell et al., 2020). Nesse contexto, os módulos descomissionados passam a ser considerados fontes relevantes de materiais valiosos. A recuperação desses recursos a partir dos resíduos pode ser entendida como uma nova forma de mineração sustentável, contribuindo para manter os materiais em circulação e reduzir a pressão sobre a extração de recursos naturais (Lee et al., 2025).

2.4. DESAFIOS DA RECICLAGEM

A viabilização da reciclagem de módulos fotovoltaicos enfrenta diversos desafios, sendo a principal barreira a falta de viabilidade econômica. O processo de reciclagem ainda é caro, enquanto o descarte em aterros sanitários apresenta baixo custo, tornando-se a alternativa mais atrativa para muitas empresas. Atualmente, a reciclagem de módulos à base de silício ocorre mais por responsabilidade ambiental do que por retorno financeiro (Prado, 2018). Além disso, há uma barreira tecnológica significativa. As tecnologias disponíveis apresentam vantagens e desvantagens específicas, priorizando a recuperação de certos materiais em detrimento de outros, e algumas envolvem o uso de produtos químicos tóxicos, o que pode gerar impactos ambientais relevantes (Farrell et al., 2020). Fatores como o alto custo energético, a limitada eficiência dos processos atuais, o número ainda reduzido de pesquisas, a ausência de incentivos econômicos e a falta de infraestrutura dificultam a implementação de soluções em escala industrial economicamente viável (Ndalloka et al., 2024).

Bošnjaković et al. (2023) acrescentam que o volume de resíduos gerado até o momento é relativamente baixo, com a maioria das usinas de reciclagem operando com capacidade inferior a 100 toneladas por ano. O autor também destaca a importância do design eficiente dos módulos. Fabricantes que compreendem e consideram técnicas de reciclagem em seus projetos contribuem para a economia circular, especialmente quando também participam do processo de reciclagem dos próprios produtos. Outro obstáculo relevante é a ausência de legislações padronizadas. A inexistência de normas internacionais unificadas

resulta em abordagens distintas entre países e regiões, dificultando o avanço global da reciclagem de módulos fotovoltaicos (Irena, 2016; Ndalloka et al., 2024).

3. METODOLOGIA

Este trabalho adotou uma abordagem exploratória e descritiva, fundamentada principalmente em revisão bibliográfica. Conforme Silva e Menezes (2005), a pesquisa exploratória busca proporcionar maior familiaridade com o tema, enquanto a descritiva visa identificar e detalhar as características do fenômeno estudado. A investigação foi conduzida por meio da consulta a bases de dados reconhecidas, como Google Acadêmico e Scopus, com o objetivo de acessar estudos atualizados e relevantes sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos. A análise desses materiais possibilitou a compreensão do panorama global quanto à destinação e reaproveitamento dos módulos ao final de sua vida útil, bem como a identificação de desafios, regulamentações existentes e soluções tecnológicas em desenvolvimento.

A utilização do Google Acadêmico contribuiu significativamente para a consolidação do referencial teórico desta pesquisa. A busca foi realizada em 18 de março de 2025 utilizando a seguinte string de pesquisa: (*"do berço ao berço"* OR *reciclagem* OR *reuso* OR *"ciclo de vida"* OR *"fim da vida"*) AND (*"célula fotovoltaica"* OR *"célula solar"* OR *"painei solar"* OR *"módulo fotovoltaico"* OR *"painei fotovoltaico"*)

A estratégia de busca adotada na plataforma Scopus consistiu na combinação de termos relacionados ao tema principal. A consulta foi realizada em 18 de março de 2025, utilizando a seguinte matriz de busca: (*(TITLE-ABS-KEY ("solar module") OR "solar panel")* AND (*(TITLE-ABS-KEY ("solar energy") OR photovoltaic)*) AND (*(TITLE-ABS-KEY (recycling OR reuse OR "cradle to cradle"))*)

Cada termo foi inicialmente testado individualmente e, em seguida, combinado com os demais para refinar os resultados. O principal foco da análise recaiu sobre a interseção entre todos os termos pesquisados, de onde foram extraídos os artigos mais relevantes para fundamentar este estudo. A Figura 2 apresenta um diagrama de Venn, utilizado como ferramenta visual para representar as interseções entre os conjuntos de termos e refinar a seleção dos trabalhos acadêmicos.

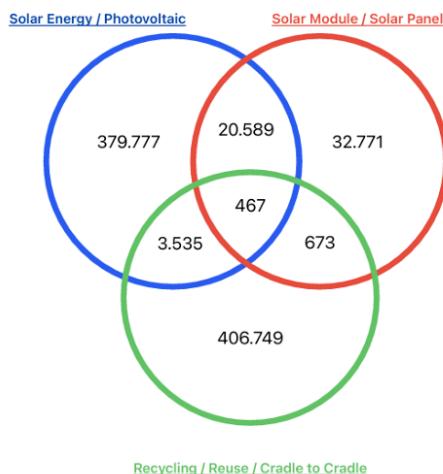


Figura 2: Diagrama de Venn: termos de busca no Scopus

Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PROCESSOS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os processos de reciclagem variam entre os módulos fotovoltaicos à base de silício cristalino (c-Si) e os de filme fino, em razão das diferenças estruturais entre esses tipos de tecnologia (Chowdhury et al., 2020). Essa diversidade dificulta o desenvolvimento de um processo único que seja capaz de atender a todas as configurações existentes (Finger, 2019). Além disso, quando o foco da reciclagem é a recuperação de silício e metais críticos, o processo tende a se tornar mais complexo, exigindo a combinação de múltiplas técnicas, que podem ser ajustadas conforme o objetivo de recuperação e o tipo de resíduo. De forma geral, a reciclagem de módulos c-Si pode ser organizada em quatro etapas principais: desmontagem, delaminação, separação e extração dos materiais (Lee et al., 2025).

4.1.1. DESMONTAGEM E RECICLAGEM MECÂNICA

A primeira etapa da reciclagem de módulos fotovoltaicos consiste na sua desmontagem, removendo as molduras de alumínio, cabos e caixas de junção. Esses componentes são inspecionados e podem ser encaminhados para reciclagem, visando à recuperação de cobre e materiais poliméricos, enquanto os módulos seguem para as fases seguintes do processo. A reciclagem mecânica é a mais adotada comercialmente devido ao seu custo relativamente baixo (Iea pvps, 2024). De acordo com a revisão de Ndalloka et al. (2024), em um estudo envolvendo cinco empresas, quatro utilizavam exclusivamente métodos mecânicos, e apenas uma combinava técnicas mecânicas, térmicas e químicas.

A reciclagem por processos mecânicos começa com a desmontagem do módulo, por meio da retirada da moldura de alumínio, da caixa de junção e dos cabos, o que pode ser feito manual ou automaticamente. Em seguida, os módulos são triturados, e os materiais resultantes — como plásticos, vidro e metais — são separados com base em propriedades físicas, como densidade, peso e condutividade (Iea pvps, 2024). Os principais materiais recuperados por esse método são o alumínio, o cobre e o vidro, os quais são comercializados como matéria-prima para uso industrial (Konzen e Pereira, 2020). Contudo, o processo apresenta limitações, especialmente quanto à recuperação do silício, que é pouco eficiente. Isso resulta no desperdício da energia empregada originalmente na fabricação dos módulos, pois o silício triturado perde seu valor agregado, sendo mais valioso em forma de lâmina do que como material bruto (Godoy, 2024). Dessa forma, os produtos obtidos pela reciclagem mecânica são matérias-primas secundárias e não produtos finais prontos para reuso (Farrell et al., 2020).

4.1.2. DELAMINAÇÃO

A delaminação, etapa considerada a mais crítica do processo de reciclagem, consiste na separação do material encapsulante do vidro e dos demais componentes dos módulos fotovoltaicos (Prado, 2018). Esse processo pode ser realizado por métodos mecânicos, térmicos, químicos ou pela combinação deles, visando otimizar a recuperação dos materiais. Na delaminação térmica, utilizam-se técnicas como a pirólise e a incineração, que vêm sendo amplamente estudadas. Segundo Dias (2015), a pirólise do EVA exige temperaturas de aproximadamente 500 °C para eliminar a camada polimérica e liberar a célula de silício do vidro. De forma semelhante, Bošnjaković et al. (2023) relatam um processo no qual os módulos são aquecidos entre 420 °C e 500 °C, com incremento de 20 °C por minuto. Durante

a pirólise, a decomposição do EVA em atmosfera inerte gera compostos como ácido acético, propano, propeno, etano, metano, além de óleos e gases combustíveis (Deng et al., 2019).

Apesar da sua eficiência, a delaminação térmica enfrenta desafios, como o alto custo energético, a necessidade de equipamentos especializados e o tratamento dos gases gerados para evitar danos ambientais (Godoy, 2024). No entanto, Farrell et al. (2020) destacam que a pirólise apresenta vantagens econômicas e ecológicas em relação à delaminação química, sobretudo por possibilitar o reaproveitamento dos polímeros como combustível. Já a delaminação química emprega solventes que dissolvem seletivamente os polímeros, favorecendo a separação entre vidro e silício. Apesar de preservar melhor os materiais, esse método apresenta limitações, como alto custo, dificuldade no manejo dos resíduos químicos e problemas associados à toxicidade e baixa degradabilidade dos solventes (Godoy, 2024). Farrell et al. (2020) ressaltam que, além desses desafios, alguns solventes não conseguem remover totalmente o EVA inchado das células, sendo necessária, nesses casos, a aplicação de um tratamento complementar, como a própria pirólise, para assegurar a completa remoção do encapsulante.

4.1.3. SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS

A separação dos materiais é uma etapa comumente associada à delaminação e baseia-se em propriedades físicas como tamanho das partículas, densidade, características eletrostáticas e magnéticas (Tembo e Subramanian, 2023). No contexto da reciclagem mecânica, essa separação é crucial, sendo a triagem por tamanho de partícula o método mais comum após a Trituração dos módulos. As partículas maiores (acima de 5 mm), geralmente compostas por cobre e backsheet polimérico, resistem mais ao esmagamento, mas ainda podem conter resíduos de silício, vidro e prata (Lee et al., 2025). Já as partículas menores (abaixo de 5 mm) são predominantemente de vidro, material reciclável (Tembo e Subramanian, 2023).

Segundo Camargo (2021), um desafio relevante é a separação do silício com prata dos fragmentos de vidro, para o qual a autora sugere o uso de um dispositivo rotativo que promova a fragmentação diferenciada entre os materiais. Já Lee et al. (2025) destacam o uso de politungstato de sódio como meio denso para a separação eficiente do silício e da prata do restante da mistura, permitindo sua recuperação em processos subsequentes.

4.1.4. EXTRAÇÃO DOS METAIS E A RECUPERAÇÃO DO SILÍCIO

A extração de metais de módulos fotovoltaicos pode ser realizada por meio de pirometalurgia, hidrometalurgia ou métodos eletroquímicos, com diferentes níveis de recuperação. Na pirometalurgia, predominam técnicas como incineração e fundição em altos fornos ou fornos de arco de plasma, que produzem barras de cobre posteriormente purificadas por eletrólise (Bettanin, 2017). No entanto, esse método apresenta alto consumo energético e emite gases tóxicos.

A hidrometalurgia, por sua vez, utiliza a lixiviação, processo em que um solvente dissolve metais sólidos, seguido de precipitação para separação das impurezas (Prado, 2018). O pré-tratamento mecânico do material é essencial para melhorar a eficiência da extração (Oliveira, 2021). Os ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3) são comumente usados como agentes lixiviantes, sendo que este último apresentou recuperação total de cobre e prata em alguns testes (Tembo e Subramanian, 2023). Apesar da maior eficiência em comparação com a pirometalurgia, seu uso em larga escala é dificultado pelo alto consumo de reagentes e impacto ambiental (Bettanin, 2017; Deng et al., 2019). A recuperação do silício pode ser feita

por ataque químico seletivo após a lixiviação. Park e Park (2014) conseguiram obter uma lâmina limpa com hidróxido de potássio (KOH), e Deng et al. (2019) relatam uma recuperação de 86% do silício, com pureza de 99,999%.

Já os métodos eletroquímicos baseiam-se nos potenciais de oxirredução dos metais presentes na solução lixiviada. Aplicando uma tensão entre eletrodos, metais como prata, cobre, chumbo e alumínio são recuperados sequencialmente no cátodo (Lee et al., 2025). A recuperação da prata pode atingir 100%, e o silício pode ser refinado por eletrorefinação em sal fundido, consumindo apenas 7,5% da energia exigida pelo método Siemens, processo mais usual para se transformar silício metalúrgico em silício adequado para a indústria fotovoltaica. Contudo, a técnica ainda está em estágio experimental (Lee et al., 2025). A Figura 3 esquematiza um processo de reciclagem utilizando métodos eletroquímicos.

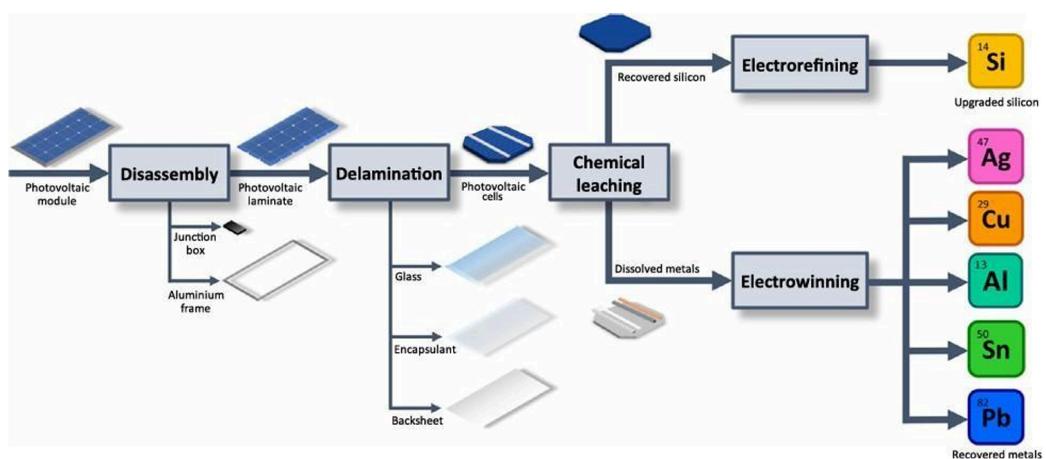


Figura 3: Diagrama de um processo de reciclagem de módulos solares por métodos eletroquímicos
Fonte: Lee et al., 2025

4.2. ASPECTOS ECONÔMICOS DA RECICLAGEM

A viabilidade econômica é o principal entrave para a expansão da reciclagem de resíduos fotovoltaicos. A reciclagem de um módulo c-Si gera entre 16 e 17 dólares (Ndalloka et al., 2024), enquanto o custo de reciclagem nos Estados Unidos varia entre 15 e 45 dólares, sendo o descarte em aterros significativamente mais barato (1 a 5 dólares) (Bošnjaković et al., 2023). Para tornar a reciclagem atrativa, os métodos devem ser otimizados ou devem ser aplicadas tarifas sobre o descarte em aterros.

Alguns metais, como prata, cobre e alumínio, são os principais atrativos econômicos (Oliveira, 2021). A prata, por exemplo, representa menos de 1% da massa do módulo, mas 47% do seu valor. O reaproveitamento do alumínio, cuja produção primária é altamente energética (200 MJ/kg), é vantajoso: sua reciclagem consome apenas 8 MJ/kg e a moldura do módulo pode ser facilmente removida (Bošnjaković et al., 2023).

A pureza dos materiais recuperados também influencia seu valor. Quando não há separação eficiente, os resíduos são classificados como “altamente misturados” e tornam-se menos valiosos (Konzen e Pereira, 2020). Além disso, devido ao baixo valor por quilograma dos módulos fotovoltaicos em comparação com outros resíduos eletrônicos, sua reciclagem é menos atrativa economicamente (Deng et al., 2019). Os custos não podem elevar demais o preço dos novos módulos, sob risco de inviabilizar sua aceitação comercial.

Estudos indicam que, para ser rentável, a reciclagem mecânica deve custar entre 400 e 500 dólares por tonelada, enquanto a térmica deve variar entre 700 e 800 dólares por tonelada (Deng et al., 2019). Em razão do baixo volume atual de resíduos, o custo de reciclagem ainda é elevado. Por isso, algumas plantas preferem armazenar os módulos até que a escala aumente e os custos se tornem viáveis. A maioria das instalações atuais recicla menos de 100 toneladas por ano (Bošnjaković et al., 2023). A viabilidade econômica é esperada quando forem recicladas 19 mil toneladas por ano, com tendência da Alemanha ser o primeiro país europeu a atingir esse patamar em 2031. Caso os métodos sejam otimizados, esse limiar pode cair para 9 mil toneladas (Deng et al., 2019; Bošnjaković et al., 2023).

A adoção de um design para facilitar a reciclagem e políticas de responsabilidade estendida do produtor (EPR), conceito que será discutido posteriormente neste trabalho, são apontadas como estratégias eficazes para impulsionar a indústria de reciclagem (Deng et al., 2019). Contudo, a ausência de uma logística reversa estruturada é outro obstáculo relevante. Um sistema eficiente de coleta e transporte é essencial para agregar valor (Godoy, 2024). No caso brasileiro, as dimensões continentais e a instalação de módulos em locais remotos tornam a implantação de uma rede logística nacional ainda mais complexa (Oliveira, 2021). Estima-se que o custo da coleta deva ser inferior a 200 dólares por tonelada para tornar a reciclagem atrativa (Deng et al., 2019).

De Oliveira et al. (2023) estimaram o valor dos materiais a serem recuperados de um módulo c-Si de 23 kg no Brasil em R\$32,88. Considerando as projeções da Irena (2016) que serão geradas entre 2.500 e 8.500 toneladas de módulos residuais no país até 2030, pode-se estimar um mercado de R\$3,5 milhões a R\$12 milhões. Analogamente, com base nas projeções de que o Brasil poderá gerar entre 300 e 750 mil toneladas de resíduos até 2050, é possível estimar um mercado potencial entre R\$428 milhões a R\$1,07 bilhão para esse período. Evidentemente, tratam-se de cálculos simplificados, cujo objetivo é apenas fornecer uma estimativa aproximada da ordem de grandeza envolvida em um mercado que apresenta forte tendência de crescimento nos próximos anos.

Além dos módulos, o reaproveitamento de outros componentes de um sistema fotovoltaico pode ampliar a rentabilidade da indústria de reciclagem. Bošnjaković et al. (2023) estimam que 79,7% dos materiais dos inversores podem ser reciclados, e que as estruturas metálicas utilizadas para suportar os módulos, majoritariamente constituídas de alumínio, representarão 2,45 milhões de toneladas de resíduos no mundo até 2050. Nos EUA, entre 2030 e 2060, a previsão é de 9,8 milhões de toneladas de resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos, com até 9,2 milhões de toneladas de metais recuperáveis, projetando um mercado de 22 bilhões de dólares apenas no país (Dominguez e Geyer, 2019).

4.3. ASPECTOS AMBIENTAIS DA RECICLAGEM

Segundo Anselmo et al. (2019), o ciclo de vida de um módulo fotovoltaico envolve impactos ambientais desde a extração e purificação das matérias-primas até a reciclagem ou descarte final. Avaliar esse ciclo é essencial para compreender os impactos socioambientais. Quando os módulos são reaproveitados ou reciclados, essa abordagem é chamada de “berço a berço”, fundamental para a economia circular.

Os resíduos dos módulos em fim de vida contêm materiais tóxicos como cádmio e chumbo (Finger, 2019), que podem contaminar o lençol freático por lixiviação, causando riscos à saúde. Em 2016, havia entre 43 e 250 mil toneladas de resíduos de módulos no mundo, com projeção de 60 a 78 milhões de toneladas até 2050 (Chowdhury et al., 2020; Irena, 2016). A deposição em aterros representa perda de recursos, enquanto a reciclagem é

ambientalmente preferível (Deng et al., 2019). Xu et al. (2018) afirma que investir em tecnologias ambientais pode gerar benefícios econômicos, mesmo elevando os custos de produção inicialmente.

O processo de reciclagem também gera impactos. A incineração do EVA libera CO₂, enquanto a pirólise é preferível por gerar menos emissões e preservar os componentes (Farrell et al., 2020). Solventes químicos, alto gasto energético e gases tóxicos são preocupações, mas ainda menos prejudiciais que o descarte em aterros (Dias et al., 2021). A incineração dos backsheets é especialmente impactante, e mais de 60% dos módulos c-Si contêm backsheets fluorados. A pirólise desses materiais pode liberar ácido fluorídrico, exigindo o tratamento das cinzas (Deng et al., 2019).

Dias et al. (2021) destaca a falta de consenso sobre os riscos tóxicos dos módulos, exigindo mais estudos. Schileo e Grancini (2021) alertam que o chumbo pode afetar enzimas e receptores essenciais, atingindo o sistema nervoso central e provocando efeitos neurológicos e físicos diversos. A prata também é classificada como resíduo perigoso segundo algumas normas (Camargo, 2021), podendo causar anemia e outros sintomas (Fagundes Góes et al., 2023). Dias (2015) identificou prata acima do limite em módulos c-Si, confirmando sua periculosidade de acordo com a NBR 10004.

O cádmio é altamente tóxico, associado a doenças graves e é considerado cancerígeno e mutagênico (Fagundes Góes et al., 2023). Anselmo et al. (2019) citam o caso de uma comunidade no Japão prejudicada pela contaminação de arroz com cádmio oriundo de uma mina. O uso do cádmio em módulos de segunda geração é uma das poucas aplicações crescentes.

O telúrio, embora escasso na crosta terrestre, é relevante para módulos de filme fino, tendo concentrado 40% do consumo mundial em 2020 (Seto, 2022). Sua reciclagem reduz a necessidade de extração de um recurso escasso (Chowdhury et al., 2020). Apesar de presente em alimentos, estudos mostram que pode causar defeitos congênitos em ratos (Schileo e Grancini, 2021).

O índio usado em módulos de segunda geração pode provocar toxicidade pulmonar e é potencialmente cancerígeno (Prado, 2018). Casos de pneumonia intersticial no Japão levaram à regulamentação do nível de índio no sangue humano (Schileo e Grancini, 2021). A recuperação desse metal na reciclagem de eletroeletrônicos ainda é baixa (Prado, 2018).

A reciclagem reduz a ocupação de aterros, o risco de vazamento de metais pesados e o consumo energético da produção de novos módulos, além de diminuir a emissão de poluentes e a pressão sobre recursos raros (Farrell et al., 2020). Também há redução no uso de água na fabricação (Camargo, 2021). Reciclar uma tonelada de módulos emite cerca de 370 kg CO₂eq, enquanto a produção com matéria-prima virgem emite entre 800 e 1200 kg CO₂eq a mais, reforçando a importância da reciclagem na redução de emissões (Camargo, 2021).

4.4. LEGISLAÇÕES E PARTICIPAÇÃO GOVERNAMENTAL

A diversidade de tecnologias fotovoltaicas e dos métodos de reaproveitamento exige regulamentações específicas para a gestão dos resíduos, tanto em nível nacional quanto internacional (Ndalloka et al., 2024). Enquanto alguns países já possuem legislações robustas, outros estão em fase inicial de discussões (Ustulin, 2024). Para Konzen e Pereira (2020), a gestão eficiente dos resíduos fotovoltaicos depende de estratégias de economia circular, políticas públicas e regulamentações alinhadas ao desenvolvimento sustentável.

A Irena (2016) ressalta que essas regulamentações são essenciais para garantir uma gestão eficiente, econômica e ambientalmente adequada, além de promover práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos produtos. Essas normas devem ser adaptadas às realidades locais de cada país ou região.

Na União Europeia, desde julho de 2012, os módulos fotovoltaicos foram incluídos na diretiva Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), considerada uma das legislações mais avançadas para resíduos eletrônicos (Ustulin, 2024). O Reino Unido foi o primeiro país a adotá-la, seguido pela Alemanha. Essa diretiva estabelece que fabricantes, importadores e revendedores devem se registrar em um sistema de conformidade e prestar informações sobre seus produtos (Chowdhury et al., 2020).

A WEEE adota o princípio da Responsabilidade Estendida ao Produtor (EPR), atribuindo aos produtores — incluindo fabricantes, distribuidores e importadores — a obrigação pela coleta e tratamento dos módulos ao fim da vida útil (Godoy, 2024; Deng et al., 2019). Segundo Godoy (2024), a EPR tem inspirado legislações em países como Estados Unidos e China, demonstrando eficácia na gestão de resíduos eletrônicos. Xu et al. (2018) reforçam que aplicar esse princípio em todo o ciclo de vida dos módulos promove uma gestão mais sustentável.

Conforme Oliveira (2021), a normativa exige que os produtores cubram os custos de coleta e reciclagem, forneçam relatórios periódicos sobre vendas, destinação e resultados dos processos, além de conscientizar os consumidores sobre o descarte correto. Também é obrigatória uma taxa de reciclagem paga pelos fabricantes que operam no mercado europeu (Xu et al., 2018).

A regulamentação inclui a responsabilidade pelos chamados “resíduos históricos”, ou seja, aqueles gerados antes da vigência da norma, sendo essa obrigação compartilhada por todos os produtores atuantes (Konzen e Pereira, 2020). A WEEE também estabelece metas: 85% de taxa de coleta e 80% de taxa de reciclagem dos materiais dos módulos (Bošnjaković et al., 2023).

Apesar dos avanços, a normativa apresenta limitações. A meta de reciclagem de 80% da massa permite foco na recuperação de materiais de maior peso, como vidro e alumínio, que somam mais de 80% de um módulo, enquanto materiais valiosos, porém de menor peso, acabam sendo descartados. Por isso, recomenda-se a adoção de metas específicas por material, em vez de metas gerais por peso. A experiência dos países que implementaram a WEEE oferece boas práticas e lições valiosas que podem ser adaptadas por outros mercados de energia solar (Irena, 2016).

No Brasil, não há regulamentação específica para módulos fotovoltaicos, que são classificados genericamente como “resíduos eletrônicos” dentro da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Segundo Majewski et al. (2023), essa ausência impede a consolidação de uma economia circular no setor, evidenciando a necessidade de modelos regulatórios baseados em experiências internacionais bem-sucedidas.

Atualmente, os módulos não estão formalmente incluídos nos sistemas obrigatórios de logística reversa, sendo tratados como eletroeletrônicos de uso doméstico, o que, segundo Ustulin (2024), gera insegurança jurídica sobre sua abrangência e obrigatoriedade. A PNRS, embora relevante, não contempla as especificidades técnicas e logísticas desse tipo de resíduo.

Outro desafio é a falta de infraestrutura adequada para coleta e processamento dos módulos, o que dificulta a reciclagem. Nesse cenário, surgem iniciativas público-privadas

voltadas à expansão dessa infraestrutura e ao fortalecimento da reciclagem como prática viável (Godoy, 2024).

Uma dessas iniciativas é o Descarte Legal, uma plataforma online que auxilia na destinação correta de resíduos, conectando os usuários a empresas licenciadas (Konzen e Pereira, 2020). O sistema promove o descarte responsável e facilita o acesso à informação, estimulando práticas sustentáveis.

Frente à ausência de uma legislação específica, Ustulin (2024) destaca dois projetos de lei em tramitação: o PL nº 3784/2023, que propõe incluir os módulos fotovoltaicos na PNRS, e o PL nº 998/2024, que busca instituir uma Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa dos Módulos. Este último define objetivos como maximizar a reciclagem, reduzir impactos ambientais, estimular o desenvolvimento de tecnologias, mercados e redes logísticas, além de estabelecer responsabilidades compartilhadas, padrões de qualidade, fundos de pesquisa e incentivos fiscais (Brasil, 2024). Essas propostas estão alinhadas às recomendações de Oliveira (2021) para uma legislação eficaz.

Ustulin (2024) reforça que incentivos fiscais são fundamentais para viabilizar a reciclagem em larga escala e promover o avanço tecnológico no setor. Ela também sugere um sistema de monitoramento baseado nos cadastros das distribuidoras de energia, facilitando o rastreamento dos módulos. Martins (2024) destaca a importância de campanhas de conscientização sobre o descarte adequado, que tende a ser bem aceita pela população diante do crescente interesse por questões ambientais. Ustulin (2024) ainda propõe um sistema de “depósito e retorno”, no qual uma taxa seria paga na compra do módulo e reembolsada no momento do descarte. Caso não haja devolução, o valor seria destinado a um fundo de logística reversa, incentivando a destinação correta.

5. CONCLUSÃO

O estudo apresentou uma análise abrangente sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos, destacando a importância do tema para um futuro próximo e os desafios associados. Verificou-se que os módulos contêm materiais valiosos como prata, cobre e silício, além de metais perigosos, como chumbo. A falta de infraestrutura para lidar com os resíduos pode gerar sérios impactos ambientais, como a contaminação de solo e água por metais pesados, além da perda de recursos que poderiam ser reaproveitados.

A análise também revelou que, apesar dos desafios econômicos atuais, a recuperação de materiais valiosos tende a tornar a reciclagem mais viável futuramente, sendo necessário superar o baixo custo do descarte em aterros. No campo regulatório, o Brasil ainda carece de normas específicas, o que limita o desenvolvimento de uma cadeia de reciclagem robusta, diferentemente de países da União Europeia. Nesse contexto, destaca-se a importância da aprovação dos PLs nº 3784/2023 e nº 998/2024, que podem impulsionar a logística reversa no país. Por fim, o estudo sugere aprofundamentos futuros em temas como viabilidade técnico-econômica dos processos de reciclagem no Brasil, desenvolvimento de modelos de logística reversa, propostas legislativas específicas e análise do aproveitamento econômico dos materiais recuperáveis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSELMO, Antonio Harley et al. **Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida.** 2019.
- BETTANIN, Andrea. **O uso de tiosulfato para a recuperação de prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos.** 2017.

BOŠNJAKOVIĆ, Mladen et al. **The End of Life of PV Systems: Is Europe Ready for It?**. Sustainability, v. 15, n. 23, p. 16466, 2023.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 998, de 2024. Institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024. em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=242375> 1. Acesso em: 24 abr. 2025

CAMARGO, Priscila Silva Silveira. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino: separação e concentração de materiais**. 2021.

CHOWDHURY, Md Shahriar et al. **An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling**. Energy Strategy Reviews, v. 27, p. 100431, 2020.

DE OLIVEIRA, Wemerson Franklyn Araujo; DA SILVA, Cristiano Cruz; DE SL BALAN, D. **Gestão dos resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos**. In: Conresol 6º. Congresso Sul-Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade. Foz do Iguaçu/PR Brazil, 2023.

DENG, Rong et al. **A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 109, p. 532-550, 2019.

DIAS, Pablo et al. **Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination—technical, environmental and economic analyses**. Resources, Conservation and Recycling, v. 165, p. 105241, 2021.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. 2015.

DOMÍNGUEZ, Adriana; GEYER, Roland. **Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America**. Renewable Energy, v. 133, p. 1188-1200, 2019.

FAGUNDES GÓES, Patrícia et al. **Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos**. GeSec: Revista de Gestão e Secretariado, v. 14, n. 8, 2023.

FARRELL, C. C. et al. **Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 128, p. 109911, 2020.

FARRELL, Charlie et al. **Assessment of the energy recovery potential of waste photovoltaic (PV) modules**. Scientific Reports, v. 9, n. 1, p. 5267, 2019.

FINGER, Daniela Negri. **Impactos ambientais e possibilidades de reciclagem dos resíduos de painéis fotovoltaicos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GIONGO, G. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

GODOY, Vinny Rafael Rodrigues. **Estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares: desafios da reciclagem e reutilização no final do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos**. 2024.

GREENER. **Estudo Estratégico 2024 – Geração Distribuída**: Mercado Fotovoltaico. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA PVPS). **Trends in Photovoltaic Applications 2024**. Paris: IEA PVPS, 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **End-of-life management: solar photovoltaic panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable power generation costs in 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2024.

KONZEN, Bárbara Anne Dalla Vechia; PEREIRA, Andrea Franco. **Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema**. In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020.

LEE, Jackson; DUFFY, Noel; ALLEN, Jessica. **A Review of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules and the Potential for Electrochemical Recycling**. Advanced Energy and Sustainability Research, v. 6, n. 2, p. 2400254, 2025.

MAJEWSKI, Peter et al. **Product stewardship considerations for solar photovoltaic panels**. AIMS Energy, v. 11, n. 1, 2023.



MARTINS, Diego Gonçalves. **Alternativas Sustentáveis para o Gerenciamento de Painéis Solares ao Final de sua Vida Útil: Uma Análise dos Meios de Reciclagem.** 2024.

NDALLOKA, Zita Ngagoum et al. **Solar photovoltaic recycling strategies.** Solar Energy, v. 270, p. 112379, 2024.

OLIVEIRA, Elaíne Vieira de. **Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração.** 2021. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

PRADO, Pedro Forastieri De Almeida. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais.** 2018.

SCHILEO, Giorgio; GRANCINI, Giulia. **Lead or no lead? Availability, toxicity, sustainability and environmental impact of lead-free perovskite solar cells.** Journal of materials chemistry C, v. 9, n. 1, p. 67-76, 2021.

SETO. **Photovoltaics End-of-Life Action Plan.** Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA, Edna Lúcia da; e MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** [S. l.: s. n.], 2005.

TEMBO, Prichard M.; SUBRAMANIAN, Vaidyanathan. **Current trends in silicon-based photovoltaic recycling: A technology, assessment, and policy review.** Solar Energy, v. 259, p. 137-150, 2023.

TOLMASQUIM, Mauricio. **Brasil: potência energética sustentável** – artigo sobre a transição energética. Folha de S. Paulo, São Paulo, p. A04, 18 fev. 2025.

USTULIN, Gabriela. **Resíduos de módulos fotovoltaicos: uma análise do cenário legislativo no Brasil e no mundo.** 2024.

XU, Yan et al. **Global status of recycling waste solar panels: A review.** Waste management, v. 75, p. 450-458, 2018.

ZILLES, R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.