

RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: uma visão geral sobre métodos e legislações a respeito do tema.

RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS: an overview of methods and legislation on the subject.

Carlos André Lima dos Santos

carlos.lsantos7@gmail.com

Prof. Me. Alexandre Manoel de Farias

alexandre.farias@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Com o crescimento exponencial dos sistemas fotovoltaicos, um dos principais desafios globais passa a ser a gestão dos resíduos decorrentes do descarte de módulos ao final de sua vida útil, estimada entre 20 e 25 anos. A destinação adequada desses resíduos é fundamental para minimizar impactos ambientais, recuperar materiais de alto valor agregado e reduzir custos produtivos, promovendo a transição para um modelo baseado na economia circular. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar os principais dados e diretrizes para a construção de um mercado de reciclagem sólido e sustentável, alinhado às melhores práticas internacionais e aos princípios da economia circular. São analisadas as principais tecnologias de reciclagem de painéis fotovoltaicos, com ênfase nos processos mecânicos, químicos e térmicos, detalhando suas aplicações, vantagens, limitações e perspectivas de desenvolvimento. Além disso, o trabalho discute o cenário regulatório internacional, destacando a lacuna existente no Brasil quanto à formulação de políticas públicas específicas para o setor. Em suma, a transição para uma economia circular plena no setor fotovoltaico exige não apenas o avanço tecnológico nos processos de reciclagem, mas também a criação de um arcabouço regulatório robusto e o engajamento coordenado entre governo, indústria, setor acadêmico e sociedade.

Palavras-chave: Painel Fotovoltaico. Reciclagem. Legislação.

ABSTRACT

With the exponential growth of photovoltaic systems, one of the main global challenges is the management of waste resulting from the disposal of modules at the end of their useful life, estimated to be between 20 and 25 years. The proper disposal of this waste is essential to minimize environmental impacts, recover high-value materials and reduce production costs, promoting the transition to a model based on the circular economy. In this context, this article aims to present the main data and guidelines for the construction of a solid and sustainable recycling market, aligned with international best practices and the principles of the circular economy. The main technologies for

recycling photovoltaic panels are analyzed, with an emphasis on mechanical, chemical and thermal processes, detailing their applications, advantages, limitations and development prospects. In addition, the paper discusses the international regulatory scenario, highlighting the gap that exists in Brazil regarding the formulation of specific public policies for the sector. In short, the transition to a fully circular economy in the photovoltaic sector requires not only technological advancement in recycling processes, but also the creation of a robust regulatory framework and coordinated engagement between government, industry, academia and society.

Keywords: Photovoltaic Panel. Recycling. Legislation.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia solar consolidou-se como uma das principais fontes de energia em nível global, destacando-se por sua abundância e baixo impacto ambiental. A maior parte dos módulos fotovoltaicos e das usinas de energia solar concentrada foi instalada após 2008. Ao final de 2018, as instalações fotovoltaicas cumulativas ultrapassaram 500 gigawatts (GW), representando um aumento superior a mil vezes em relação à produção anual da década anterior, o que é suficiente para abastecer mais de duzentos milhões de residências (MULVANEY, 2019).

Entretanto, os painéis solares, que são fundamentais para a produção de energia, possuem uma vida útil estimada entre 25 e 30 anos. Com o crescimento contínuo da capacidade instalada, o mundo poderá enfrentar um desafio significativo relacionado ao gerenciamento de resíduos, que pode atingir milhões de toneladas (SEO, B.; KIM, J. Y.; CHUNG, J., 2021). A maioria dos painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado é composta por silício, além de outros metais, cerâmicas e polímeros. Ao longo das últimas décadas, cientistas, pesquisadores e empresas do setor energético têm se dedicado ao desenvolvimento de tecnologias que modernizam os equipamentos utilizados na geração de energia solar (MACHADO; MIRANDA, 2014). Como resultado, as substituições de painéis, que deveriam ocorrer ao final de sua vida útil, estão sendo realizadas em um intervalo de 10 a 15 anos.

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em 2016, estimou-se que cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis solares seriam descartados globalmente até 2050. Com o crescimento do mercado de geração solar e o aumento considerável da produção, esse número tende a ser ainda maior (IRENA, 2016). No Brasil, estima-se que a produção de resíduos fotovoltaicos alcance aproximadamente 356.500 toneladas até 2030, com base em metodologias desenvolvidas pela IRENA (2016) e dados sobre geração e potência instalada, considerando as projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Outro ponto a ser considerado é a falta de legislação específica no Brasil que trate do tema, já que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 não abrange os painéis fotovoltaicos. Desta forma, são abordadas legislações em outros continentes, sendo a Europa expoente nesta área, já que em 13 de agosto de 2012 foi publicada a Diretiva Europeia 2012/19/EU (Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE) que tem como objetivo alvos específicos de recuperação e reciclagem dos painéis fotovoltaicos imputando os custos aos produtores (Official Journal of the European Commission, 2012).

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de um mercado estruturado que viabilize a reciclagem total desses materiais descartados, promovendo a transição para um modelo de “economia circular”, no qual os recursos são reaproveitados de forma eficiente, reduzindo impactos ambientais e otimizando o uso de matérias-primas. No entanto, por se tratar de um setor ainda incipiente, persiste um desconhecimento significativo entre profissionais e a comunidade acadêmica quanto às tecnologias disponíveis, às boas práticas e à legislação aplicável, tanto em nível nacional quanto internacional. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama abrangente sobre os processos de reciclagem de painéis fotovoltaicos, explorando as soluções tecnológicas mais avançadas e as regulamentações vigentes, a fim de oferecer um compêndio atualizado e

sistematizado que auxilie profissionais, estudantes e a comunidade científica na compreensão e implementação de práticas sustentáveis e alinhadas às diretrizes globais de gestão de resíduos eletrônicos.

2 TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos essenciais para a geração de energia elétrica, transformando a luz do sol em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Compostos por células de silício – material semicondutor altamente eficiente na conversão da radiação solar em corrente elétrica – esses módulos desempenham um papel fundamental na produção de energia renovável e sustentável. Utilizados em sistemas residenciais, comerciais e usinas solares de grande porte, eles contribuem para a redução da dependência de fontes fósseis, diminuem a emissão de gases poluentes e promovem uma alternativa limpa e economicamente viável para a matriz energética global.

No Brasil, o início da implantação de energia solar fotovoltaica deu-se através da Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração (caracterizada por uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW) e minigeração (central geradora de energia solar fotovoltaica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como o sistema de compensação tarifário da energia elétrica gerada. Isto, aliado as características naturais favoráveis para implantação e condições atraentes para aquisição oferecidas por instituições financeiras, fez com que, houvesse uma expansão a altos índices em poucos anos, prometendo expandir-se ainda mais nas próximas décadas (SILVA et al., 2019).

Com o avanço contínuo e a expansão da instalação de equipamentos para a geração de energia solar, os resíduos gerados pelos painéis fotovoltaicos (FV) estão emergindo como uma questão significativa. Estima-se que até 2050 os fluxos globais cumulativos de resíduos fotovoltaicos deverão atingir entre 60 e 78 milhões de toneladas (Mton) (DIVYA et al., 2023).

Para diminuir os impactos causados por esses resíduos, ambientais e danos à saúde, é preciso um gerenciamento eficiente e sustentável como, por exemplo, a utilização destes resíduos como matéria prima secundária através da reciclagem. Estes resíduos dos painéis fotovoltaicos são física e quimicamente divergentes ao resíduo sólido urbano ou industrial, pois pode conter materiais valiosos, os quais podem ser recuperados, e perigosos, que necessitam de procedimentos especiais para evitar a contaminação do meio ambiente e danos à saúde (ZHANG, L.; XU, Z, 2016).

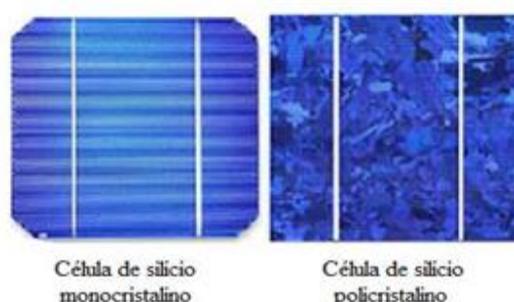
Desta forma, as tecnologias de tratamento químico e físico, são alguns dos métodos usados para a reciclagem de painéis fotovoltaicos de silício. Porém há poucas informações sobre tais estudos e sobre seus impactos ambientais durante o processo de reciclagem (LATUNUSSA e col., 2012).

2.1 Tipos de painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são classificados em três gerações, organizadas conforme a tecnologia aplicada. Essa categorização é baseada nos diferentes materiais empregados na fabricação das células e módulos fotovoltaicos.

A primeira geração corresponde à tecnologia mais consolidada e amplamente utilizada no mercado atual: o silício cristalino (crystalline silicon – c-Si). Esta tecnologia se apresentou de duas formas diferentes: através das células monocristalino, produzida a partir de um único cristal de silício e a célula policristalino produzida a partir de vários cristais menores. Uma representação das duas células é apresentada na Figura 1. Sua popularidade se deve, principalmente, à alta eficiência, variando entre 14% e 22%, além da sua confiabilidade operacional.

Figura 1 – Módulos de silício.



Fonte: Adaptado de ANDREOTTI (2013).

No entanto, ao longo do tempo, essa tecnologia passou por avanços significativos que elevaram seu desempenho e ampliaram suas aplicações. Entre as melhorias mais relevantes, destacam-se as células TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), que oferecem maior eficiência por meio de um melhor passivamento da superfície e redução da recombinação de cargas. As células HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) combinam camadas de silício amorfo e cristalino para obter alta eficiência e melhor desempenho em altas temperaturas. As células do tipo N (n-type), por sua vez, apresentam menor degradação induzida pela luz (LID) e maior tolerância a impurezas, em comparação com as células do tipo P (p-type). Além disso, o conceito de half-cell (meia célula) também contribuiu para o aumento da eficiência dos módulos, reduzindo as perdas resistivas e melhorando a resposta em condições de sombreamento parcial. Essas inovações mostram que, mesmo dentro da chamada primeira geração, houve uma evolução tecnológica significativa que continua impulsionando a competitividade da energia solar fotovoltaica (HARRISON, S. et al., 2020).

A tecnologia de filme fino (Figura 2) caracteriza a segunda geração de painéis fotovoltaicos, englobando materiais como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre-índio-selênio (CIS) e cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). Em 2015, esse tipo de tecnologia representava aproximadamente 7% da produção global de painéis solares. Charles et al. (2016) escreve que:

“A segunda geração necessita de menos materiais e menor energia para sua produção e oferece menor custo de geração de eletricidade, curto tempo de

retorno de energia [energy payback time – EPBT] e emissões reduzidas associadas à geração de eletricidade.”

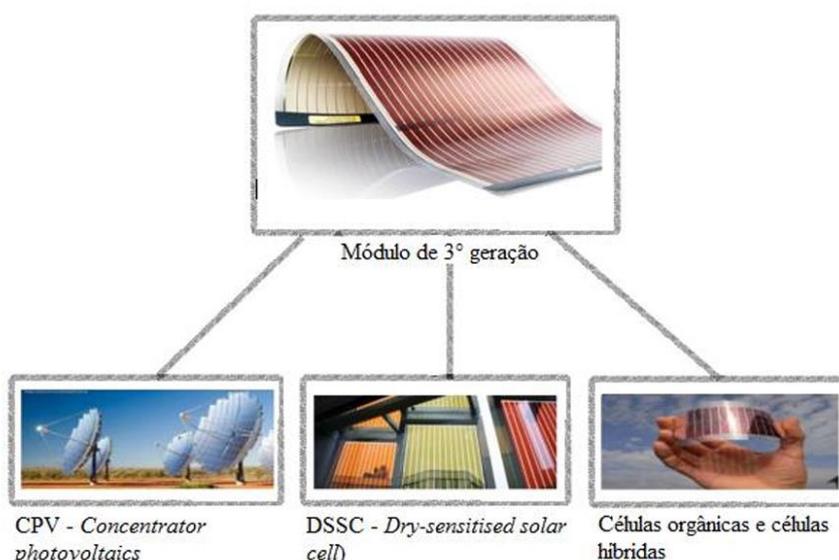
Figura 2 – Módulos de filmes finos.



Fonte: Adaptado de CRESESB (2025).

A terceira geração de tecnologias fotovoltaicas (3GPV), também chamada de fotovoltaica imprimível (Printable Photovoltaic – PPV), está representada na Figura 3. Composta por dispositivos de filme fino, o destaque dessa geração vai para as células solares sensibilizadas por corantes (Dye-Sensitized Solar Cells – DSSCs), as células fotovoltaicas orgânicas (Organic Photovoltaics – OPVs) e as células de perovskita (Perovskite Solar Cells – PSCs) (CHARLES et al., 2016). Além dessas, essa geração também inclui os concentradores fotovoltaicos (Concentrated Photovoltaics – CPV) e os de alta concentração (High Concentrated Photovoltaics – HCPV), além das células multifuncionais III-V. Essas últimas recebem esse nome devido aos elementos químicos envolvidos: o grupo III abrange alumínio (Al), gálio (Ga) e índio (In), enquanto o grupo V inclui arsênio (As) e fósforo (P). A tecnologia HCPV se destaca por alcançar uma eficiência impressionante de até 41,4%, embora seu custo de fabricação seja consideravelmente mais alto (PAYET et al., 2019).

Figura 3 – Módulo de terceira geração.



Fonte: Adaptado de CRESESB (2025).

3 RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A reciclagem de módulos fotovoltaicos é um tema de grande importância, especialmente considerando o crescimento exponencial da energia solar como fonte renovável relatada anteriormente. Devido a vida útil estimada dos módulos ser entre 25 e 30 anos, o aumento contínuo da capacidade instalada, o mundo poderá enfrentar um desafio significativo relacionado ao gerenciamento de resíduos, que pode atingir milhões de toneladas. Nessa seção serão abordadas as formas e a legislação vigente que o mundo tem pensado para resolver esse problema.

3.1 Economia circular

O modelo econômico linear, amplamente adotado em diversos setores produtivos, causa impactos ambientais significativos, pois segue a lógica de extração, transformação, produção, uso e descarte — com eventuais processos de reciclagem ou incineração (LEITÃO, 2015). Esse sistema intensifica a pressão sobre os recursos naturais, muitos dos quais são limitados.

Como alternativa ao modelo tradicional, surge a Economia Circular (EC), que propõe uma abordagem sustentável baseada em inovações de produtos, processos e modelos de negócios. Diferente do modelo linear, a EC busca reintegrar resíduos ao ciclo produtivo, evitando o descarte e promovendo a criação de novos bens de consumo (LEITÃO, 2015). Essa abordagem visa a transição para uma economia focada em serviços, onde os consumidores atuam como usuários, e não necessariamente proprietários dos produtos, sendo apoiada por estratégias como reciclagem, reutilização e remanufatura (CHARLES et al., 2016).

Os benefícios desse modelo são diversos, incluindo a redução dos custos com materiais, o fortalecimento de cadeias de suprimentos mais resilientes e sustentáveis, a diminuição dos impactos ambientais e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que essa abordagem possa gerar uma economia de até 600 bilhões de euros para os países da União Europeia. Além disso, um aumento de 30% na produtividade até 2030 poderia impulsionar o PIB em quase 1% e criar aproximadamente 2 milhões de novos empregos na região (KALMYKOVA, 2017).

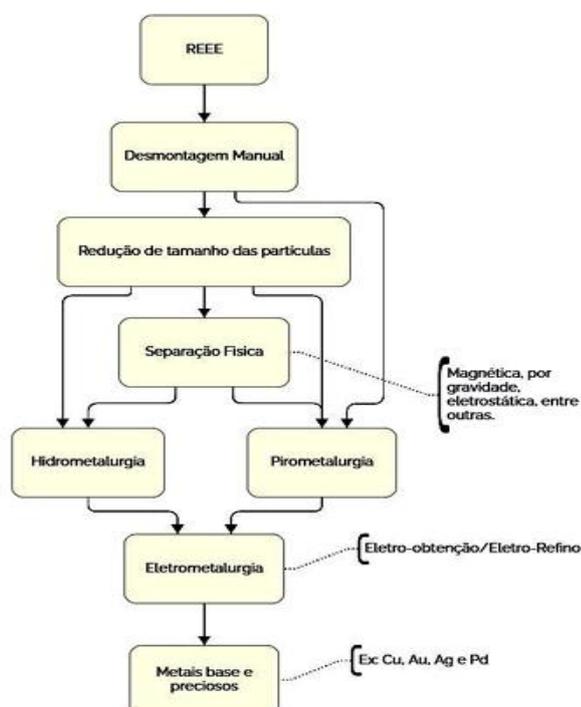
A adoção da Economia Circular pode ocorrer de duas formas: em uma escala abrangente, impactando toda a economia de uma determinada região, ou com um foco direcionado a setores estratégicos, organizados em vetores como produtos, materiais e substâncias (KALMYKOVA, 2017), sendo o setor de energia um exemplo relevante.

No contexto da produção de painéis fotovoltaicos, que atualmente depende de matérias-primas críticas (CRMs), a implementação de um modelo circular aliado a uma escolha criteriosa de materiais pode ampliar a vida útil dos produtos e estimular a colaboração entre diferentes indústrias e cadeias de suprimentos (CHARLES et al., 2016).

Segundo Bettanin (2017), o destino dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) pode seguir três caminhos principais: reuso, remanufatura e reciclagem. O reuso acontece quando o equipamento já não atende às necessidades do usuário original, mas ainda pode ser utilizado por outras pessoas. Já a remanufatura consiste em aproveitar componentes desses resíduos para fabricar

novos produtos ou revitalizar equipamentos seminovos. Esse processo envolve a desmontagem, limpeza, reparo e posterior montagem de um novo equipamento (WILLIAMS et al., 2001). A reciclagem entra em cena quando o reuso e a remanufatura não são viáveis. Na reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos, é comum realizar desmontagens manuais seguidas de processos automatizados, com o objetivo de separar e concentrar os materiais de interesse (CUI e FORSSBERG, 2003). Nesse caso, o resíduo passa por processos de desmontagem ou destruição, de modo a recuperar os materiais de valor presentes em sua composição (CUI e ZHANG, L., 2008). Posteriormente, diferentes métodos são empregados para a eliminação de impurezas e extração de metais, entre eles as técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas (CUI e ZHANG, L., 2008). Um fluxograma representando típicos processos para a recuperação de metais provenientes de REEE é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma de processos para recuperação de metais de REEE.



Fonte: Adaptado de YAZICI e DEVECI (2009).

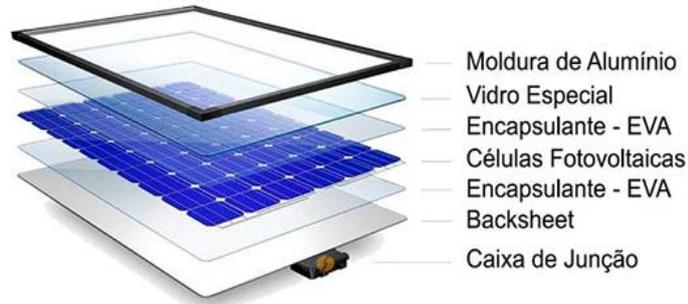
3.2 Tecnologias utilizadas para reciclagem

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) destacam-se no mercado de energia solar devido ao seu alto potencial de reciclagem, principalmente por serem amplamente instalados globalmente. Esses módulos são compostos por vários componentes, como moldura, vidro, filme encapsulante (EVA), célula fotovoltaica, backsheet e caixa de junção. Dentre esses, os materiais com maior valor para reciclagem em larga escala são a moldura, o vidro, a caixa de junção e as células fotovoltaicas (wafers) (DIVYA et al., 2023), como ser observado na Figura 5.

A estrutura dos módulos de silício padrão inclui uma moldura de alumínio e uma folha de vidro protetora, sob a qual as células de silício estão dispostas. A camada de backsheet oferece proteção na parte traseira, enquanto o encapsulante transparente

mantém a integridade da estrutura. As células são conectadas em séries e seus contatos são soldados a barramentos metálicos para permitir a extração de corrente elétrica (ISHERWOOD, 2022).

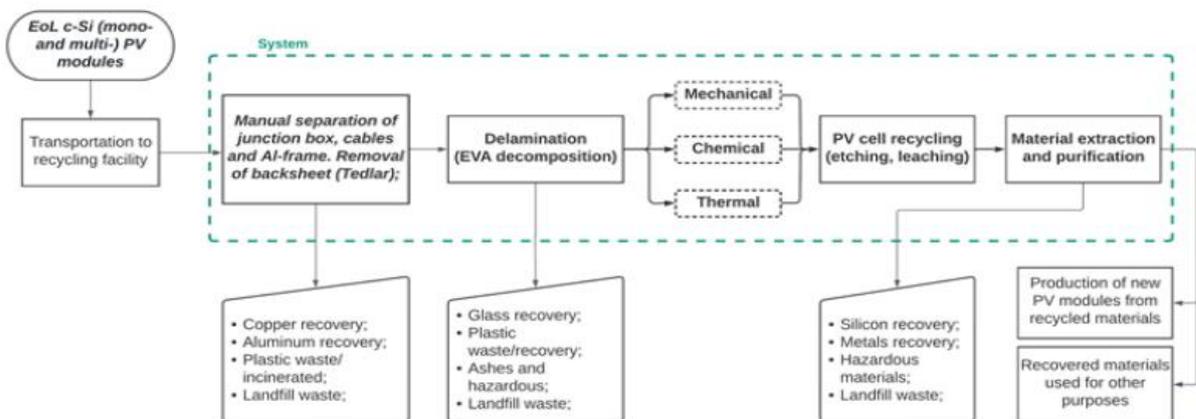
Figura 5 – Componentes de um painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de PUPIN (2019).

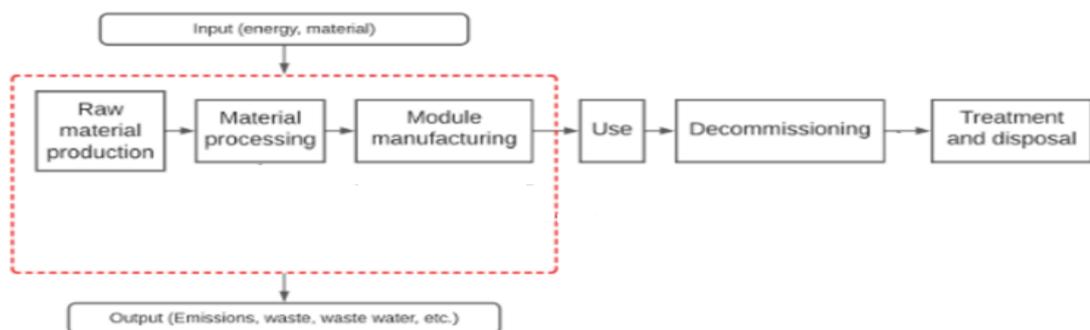
Nas figuras abaixo, estão esquematizados o ciclo de vida de um módulo fotovoltaico em duas situações distintas, quando ocorre o processo de reciclagem (Figura 6), e quando não ocorre a reciclagem (Figura 7). A partir destes esquemas é possível ter uma noção espacial e processual sobre tudo o que engloba a reciclagem destes aparelhos e toda a sua extensão de ação, do ponto de vista dos materiais e dos processos usados (MULAZZANI, et al., 2022).

Figura 6 – Ciclo de vida de um módulo reciclado.



Fonte: Adaptado de MULAZZANI (2022).

Figura 7 – Ciclo de vida de um módulo não reciclado.



Fonte: Adaptado de MULAZZANI (2022).

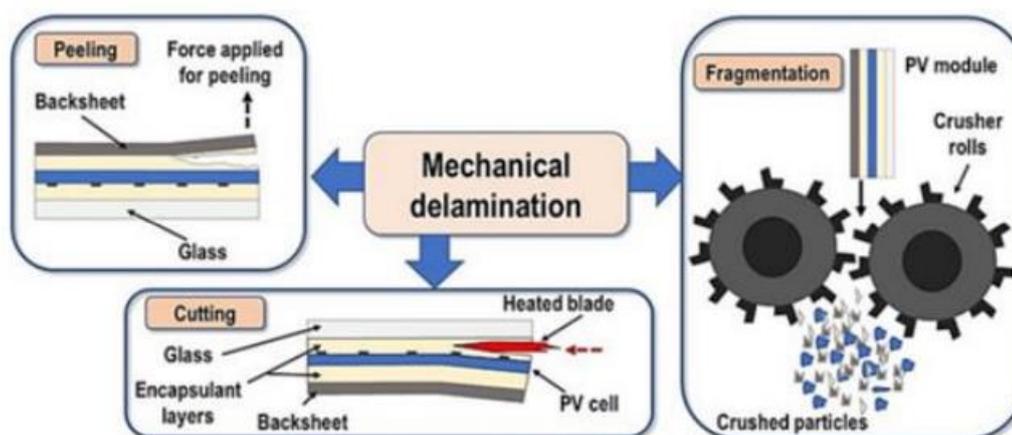
3.2.1 Processos de Reciclagem

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos pode ser realizada por diferentes técnicas, divididas em alguns grupos principais: Processamento Mecânico, Hidrometalurgia e Térmico. Além disso, métodos híbridos combinam essas abordagens (LIANG et al., 2022).

3.2.1.1 Processamento Mecânico

Os primeiros estágios na recuperação de metais de resíduos de equipamentos eletrônicos geralmente envolvem métodos físicos ou mecânicos. Para essa finalidade, diversos procedimentos de tratamento foram desenvolvidos, os quais se baseiam nas diferenças físicas dos materiais. As técnicas mais comumente utilizadas incluem separação eletrostática e/ou magnética, separação por densidade, separação granulométrica e, também, a cominuição ou moagem (ISILDARA, et al., 2017), conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Reciclagem mecânica.



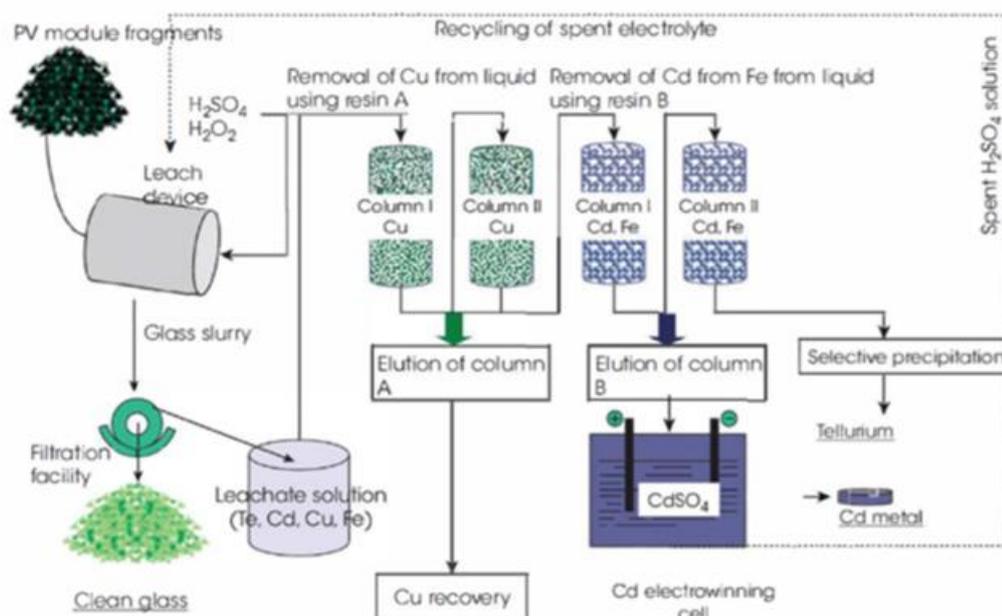
Fonte: Adaptado de TEMBO e SUBRAMANIAN (2023).

A moagem é um passo fundamental nas etapas iniciais da reciclagem, pois desempenha um papel crucial nos processos subsequentes (ZHANG; FORSSBERG, 1997). Frequentemente, após a moagem, utiliza-se a separação granulométrica para uniformizar o material triturado, dado que algumas substâncias tendem a se concentrar em certas frações. JANYASUTHIWONG, et al. (2015) observaram que, em resíduos de PCI, o cobre estava mais presente em partículas com tamanhos superiores a 0,5 mm, em comparação com frações menores.

Outra técnica de processamento mecânico é a separação por densidade, que envolve a passagem de materiais por um fluido (seja ar ou líquido), utilizando forças gravimétricas para separar os materiais de acordo com suas diferenças de densidade (VEIT, et al., 2014). Além disso, a separação magnética pode ser aplicada após a moagem do material, especialmente em resíduos eletrônicos. Nesse processo, as propriedades magnéticas dos materiais são exploradas para concentrar metais ferromagnéticos, como ferro, níquel e cobalto, na fração magnética (KASPER, et al., 2011).

A separação eletrostática pode ser definida como um fracionamento seletivo de corpos carregados eletricamente, e tem sido comumente utilizado em experimentos

Figura 10 – Processo hidrometalúrgico para reciclagem de painéis.



Fonte: Adaptado de FTENAKIS (2018).

3.2.1.3 Processamento Térmico

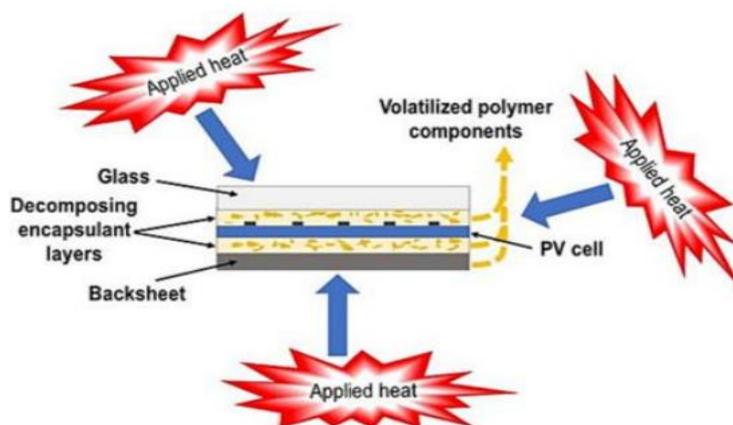
A reciclagem térmica utiliza altas temperaturas para decompor o encapsulante EVA através do processo de pirólise. A decomposição começa a cerca de 210°C, com o EVA se quebrando em compostos mais simples à medida que a temperatura aumenta. A separação dos materiais não poliméricos, como células fotovoltaicas e vidro, ocorre quando o polímero se desintegra completamente a temperaturas superiores a 480°C. Embora eficaz, a reciclagem térmica apresenta desafios, como a emissão de gases tóxicos e o alto consumo de energia, o que pode limitar sua viabilidade (ZHANG et al., 2023), como demonstrado na Figura 11.

3.3 Legislação Existente no Brasil

Com o avanço contínuo da produção de energia solar no Brasil, o país tem se dedicado a ampliar o acesso e a utilização dessa fonte energética. Para alcançar esse objetivo, o governo federal implementou uma série de ações e programas estratégicos ao longo dos últimos anos. Entre eles, destacam-se: o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), lançado em 1994; o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), em 2002; a criação, em 2011, de um programa específico de pesquisa e desenvolvimento coordenado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); o Luz para Todos, também de 2011; o sistema de compensação de energia elétrica (net metering), regulamentado pela ANEEL em 2012; o Fundo Solar, lançado em 2013; Entre 2013 e 2018, os principais investimentos públicos em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) em energias renováveis no Brasil foram em biocombustíveis e energia solar. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) foram os principais órgãos e programas federais envolvidos; o

Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD), em 2015; a desoneração do PIS e COFINS para a energia excedente injetada na rede pelos consumidores, introduzida em 2015; e, por fim, o Fundo Clima, criado em 2018 para financiar projetos relacionados à energia limpa (SILVA, 2015).

Figura 11 – Processo Térmico para reciclagem de painéis.



Fonte: Adaptado de FTHENAKIS (2018).

Essas medidas colaboraram significativamente para o fortalecimento da energia solar no território nacional, permitindo que essa fonte apresentasse índices de crescimento mais expressivos do que alternativas renováveis (ROSA et al., 2021). Conseqüentemente, observou-se também o crescimento da produção de módulos fotovoltaicos, o que, por sua vez, levanta preocupações em relação ao descarte adequado desses equipamentos, cuja vida útil gira em torno de 25 anos (RIGO et al., 2022).

Diante desse contexto, torna-se urgente a implementação de estratégias voltadas à gestão e reaproveitamento dos resíduos provenientes de painéis fotovoltaicos, de forma a evitar desperdícios e reduzir impactos ambientais e econômicos (XU et al., 2018). Nesse processo, a participação do poder público se mostra fundamental, seja através da criação de políticas específicas, incentivos financeiros, ou regulamentações que estimulem fabricantes e consumidores a assumir responsabilidades compartilhadas (MAHMOUD et al., 2021).

No cenário brasileiro, a destinação adequada dos resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos está respaldada por diretrizes legais importantes. Entre elas, destacam-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e o Acordo Setorial para o setor de eletroeletrônicos, formalizado em outubro de 2019 (KOZEN; PEREIRA, 2020).

A PNRS estabelece, entre outros pontos, a prioridade para práticas de reutilização e reciclagem de resíduos sólidos. O artigo 32 da referida legislação determina que as embalagens devem ser destinadas à reciclagem quando não houver possibilidade de reaproveitamento (BRASIL, 2010).

Por sua vez, o Acordo Setorial direciona obrigações específicas a fabricantes, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos. Estes agentes têm o dever de estruturar e operar sistemas de logística reversa, garantindo que os produtos descartados pelos consumidores retornem para o ciclo produtivo ou recebam a destinação ambientalmente correta (BRASIL, 2019). Além disso, o documento

caracteriza os produtos eletroeletrônicos como aqueles equipamentos de uso doméstico que dependem de energia elétrica para funcionar, com tensão nominal de até 240 volts (BRASIL, 2019).

Entretanto, as Leis vigentes, não tratam especificamente da destinação de painéis FV, uma vez que, na Política Nacional de Resíduos Sólidos, estes não são mencionados. Na Tabela 1 é apresentada a lista de regulamentações que orientam, para o correto descarte dos resíduos desse gênero, inclusive os fotovoltaicos.

Tabela 1 – Regulamentações para destinação de resíduos eletroeletrônicos.

Lei / Decreto	Situação em tramitação	Regulamento
Lei 12.305/2010	Aprovada, encontra-se em vigor.	Institui a PNRS, dispendo sobre seus princípios, objetivos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos.
Lei 14.260/2021	Aprovada, encontra-se em vigor.	Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecycle) e Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecycle).
Decreto 10.240/2020	Aprovado, encontra-se em vigor.	Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305/2010, e complementa o Decreto nº 9.177/2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico.
Decreto 48.090/2020	Aprovado, encontra-se em vigor.	Isenção de ICMS sobre coleta e da armazenagem de resíduos de produtos eletrônicos e seus componentes.
Decreto 10.936/2022	Aprovado, encontra-se em vigor.	Regulamenta a Lei 12.305/2010.
Decreto 12.106/2024	Aprovado, encontra-se em vigor.	Regulamenta o incentivo fiscal à cadeia produtiva da reciclagem estabelecido na Lei nº 14.260/2021.

Fonte: Autoria própria – Adaptado de SANTOS et al., 2023.

4 SOLUÇÕES EMPREGADAS NO MUNDO E NO BRASIL E PERSPECTIVAS FUTURAS

A reciclagem de painéis fotovoltaicos (PV) é tecnicamente viável, mas comercialmente desvantajosa devido aos custos elevados em equipamentos, mão de obra e logística, com a venda dos materiais recuperados ainda não cobrindo os custos de produção em larga escala (MULAZZANI et al., 2022). A regulamentação e legislação de reciclagem variam entre países, tendo a Grã-Bretanha, Alemanha, França e Itália como líderes na implementação de diretivas de reciclagem. Além disso,

países como Japão, EUA e China aumentam suas capacidades de PV e investem em processos de reciclagem, recuperando até 90% do vidro e 95% dos semicondutores dos módulos (PEREZ-GALLARDO et al., 2017).

Apesar de seus benefícios ambientais, a reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda enfrenta desafios como emissões de solventes, exigindo maior investimento em medidas de proteção ambiental para viabilizar o processo (XU et al., 2018). Estima-se que as matérias-primas dos painéis solares possam valer até 450 milhões de dólares até 2030, refletindo um potencial significativo para geração de energia e produção de novos módulos (ANUSUYA et al., 2023). O setor enfrenta uma dualidade: por um lado, o crescimento da utilização de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica; por outro, as barreiras econômicas impostas por financiadores como governos e empresas (DIVYA et al., 2023).

Em termos de processos de reciclagem, Austrália, EUA e Irã, bem como, os países que formam a União Europeia têm implementado diferentes métodos. Na Austrália, um estudo de Rahman et al. (2016) propôs um processo de reciclagem do silício com alta pureza, atingindo 99,33%. Nos EUA, empresas como Solar World e First Solar trabalham na recuperação de metais valiosos de módulos fotovoltaicos, com estudos como o de Huang et al. (2017) focados na recuperação de metais como chumbo, prata e cobre através de pirólise e lixiviação ácida.

No Irã, Nili et al. (2021) apresentaram um modelo de cadeia de valor fotovoltaica sustentável, com foco na reciclagem e recuperação de materiais valiosos, avaliando a viabilidade de localizações geográficas para centros de produção e reciclagem. A União Europeia, por sua vez, desenvolveu a Diretiva WEEE e o projeto Full Recovery End of Life Photovoltaic (FRELP), que visa a reciclagem de módulos fotovoltaicos, incluindo a recuperação de silício, utilizando métodos como tratamento térmico, lixiviação ácida e eletrólise (Majewski et al., 2021).

No que diz respeito a regulamentação, observa-se que alguns países usuários de FV revisaram suas legislações com o intuito de promover uma melhor destinação de seus FV obsoletos (MAHMOUDI et al., 2021). Isto pode ser observado na Tabela 2, através das políticas formuladas nos países líderes na utilização de módulos fotovoltaicos.

Tabela 2 – Legislações em países líderes de produção de energia FV.

Local	Legislação	Descrição
Alemanha	Diretrizes de Resíduos Elétricos e Eletrônicos (WEEE).	Embora a Diretiva WEEE tenha entrado em vigor na Alemanha em outubro de 2015, por meio de uma modificação da Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, a parte mais importante da diretiva era fornecer suporte financeiro, criar coleta e recuperação de resíduos fotovoltaicos para a reciclagem adequada das enormes quantidades de capacidade histórica instalada na Alemanha.
Austrália	Resíduos Elétricos e Eletrônicos.	Sistemas FV foram relacionados na lista anual de produtos prioritários de acordo com a seção 108A do Product

		Stewardship Act 2011. Regulamento de gerenciamento de fim de vida esperado para 2023.
China	Regulamento de Gestão de Reciclagem de Resíduos de Produtos Elétricos e Eletrônicos.	Tornou obrigatório que o lixo eletrônico seja coletado de diferentes maneiras e reciclado em um sistema de processamento centralizado. Atualmente, no entanto, os painéis fotovoltaicos não estão incluídos no diretório de processamento de resíduos de produtos elétricos e eletrônicos do regulamento
Estados Unidos da América	Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA).	Cada estado deve introduzir seus próprios regulamentos de reciclagem. Apenas o estado de Washington fez isso, até o momento.
Índia	Lei Geral de resíduos.	A Índia não tem leis específicas para o descarte de resíduos de painéis solares fotovoltaicos. No entanto, o Ministério de Energia Nova e Renovável (MNRE) exige que os desenvolvedores de usinas solares garantam a coleta e o descarte adequado dos painéis.
Itália	Diretrizes de Resíduos Elétricos e Eletrônicos (WEEE).	Embora em julho de 2005, a Diretiva WEEE tenha entrado em vigor no sistema italiano de coleta de lixo eletrônico, devido à falta de mecanismo financeiro em vigor e regulamentação clara, isso não foi levado adiante agressivamente. Além disso, não havia uma organização legal presente para monitorar a operação de trabalho do sistema. Portanto, a Itália tem uma pequena quantidade de dados históricos neste princípio e experiência prática limitada.
Japão	Lei de Gestão de Resíduos e Purificação Pública.	Projeto da Organização de Nova Energia e Desenvolvimento Industrial (NEDO) sobre desenvolvimento de reciclagem de painéis FV concluído em 2018. Regulamentos em desenvolvimento.

Reino Unido ¹	Diretrizes de Resíduos Elétricos e Eletrônicos (WEEE).	A Grã-Bretanha foi o primeiro país a aceitar oficialmente a diretiva WEEE. De acordo com os regulamentos da política britânica, que entraram em vigor em 1º de janeiro de 2014, tornou necessário que todos os fabricantes compartilhassem todos os dados, como o número de módulos fotovoltaicos produzidos ou importados e seus canais de rede de entrega e eles também devem ter um plano de conformidade de produto registrado.
Suíça	SENS e a SWICO RECYCLING	Assumiram o compromisso de aderir às Normas Europeias para coleta, logística e descarte seguro de WEEE por meio da EN 50625 obrigatória.

Fonte: Autoria própria – Adaptado de MAHMOUDI et al., 2021.

A União Européia (EU) criou uma das principais estruturas regulatórias com base nas diretivas WEEE para lidar com resíduos elétricos e eletrônicos. O objetivo desta estrutura é abordar efetivamente a geração de resíduos elétricos e eletrônicos nos 28 estados-membros da UE e definir certo nível de responsabilidades entre diferentes partes interessadas (XU et al., 2018). De acordo com as diretivas WEEE, todos os fabricantes de produtos elétricos ou eletrônicos são legalmente responsáveis pelo gerenciamento adequado de resíduos do produto, não importa onde a instalação de fabricação esteja localizada. A diretiva WEEE tem diretrizes detalhadas que incluem coleta, recuperação, reciclagem, juntamente com a segurança ambiental e de saúde pública (MCDONALD e PEARCE, 2010).

A primeira diretiva WEEE entrou em vigor em 2003, mas não tinha provisão adequada para lidar com o fluxo de resíduos em grande escala e diversificado de resíduos de módulos fotovoltaicos. Em 2012, seguindo uma proposta da Comissão da UE, a diretiva foi modificada ainda mais para o gerenciamento de fim de vida útil do módulo fotovoltaico. No entanto, esta Diretiva WEEE modificada entrou em vigor em 13 de agosto de 2012, e os estados-membros da UE começaram a implementar uma nova estrutura legal para resíduos de módulos fotovoltaicos.

Atualmente, todos os 28 estados-membros da UE tomaram iniciativas para estabelecer o regime de coleta e manuseio de módulos fotovoltaicos de acordo com a diretiva (Parlamento Europeu e Conselho, 2012). De acordo com a mais recente Diretiva WEEE, os fabricantes de PV têm a principal responsabilidade pelos custos de coleta, manuseio e tratamento. No entanto, eles devem satisfazer um certo número de requisitos e responsabilidades conforme declarados na diretiva WEEE.

¹ O Reino Unido deixou de fazer parte da União Europeia em janeiro de 2021 através do Brexit. No entanto, o Reino Unido adota a diretriz WEEE, tal como outros países que não fazem parte da União Europeia.

No Brasil, a regulamentação sobre o tema, bem como, sua aplicação prática enfrenta dificuldades. Isso ocorre, sobretudo, pela ausência de mecanismos eficazes de fiscalização e cobrança por parte das autoridades, além da carência de informação e conscientização por parte da população sobre as alternativas corretas de descarte (KOZEN; PEREIRA, 2020). Em contraste, o Reino Unido já apresenta um sistema consolidado, onde o governo, amparado pela legislação REEE, aplica sanções e multas a fabricantes e importadores de equipamentos fotovoltaicos que não cumprem suas obrigações no que diz respeito ao tratamento dos produtos ao final de sua vida útil (XU et al., 2018).

Outro fator preocupante é a baixa participação dos consumidores no descarte adequado desses resíduos, uma vez que poucos se deslocam até os pontos de coleta disponíveis. Essa falta de adesão contribui para o aumento do descarte inadequado de resíduos eletrônicos (PUPIN, 2019).

Diante desse cenário, destacam-se alguns desafios cruciais a serem enfrentados:

- I. A inexistência de políticas de incentivo ou subsídios que estimulem o retorno e a reciclagem de módulos fotovoltaicos (GUIMARÃES et al., 2021);
- II. A carência de fiscalização efetiva por parte das autoridades públicas (KOZEN; PEREIRA, 2020);
- III. A necessidade de redução dos custos associados à reciclagem de módulos FV, tornando essa opção mais viável economicamente (MIRANDA, 2019);
- IV. A falta de conhecimento e acesso à informação por parte da sociedade quanto às possibilidades de descarte correto (KOZEN; PEREIRA, 2020);
- V. Deficiências institucionais e de gestão em diversos municípios brasileiros, especialmente aqueles de menor porte (HEBER; SILVA, 2014);
- VI. Baixa participação das empresas do setor privado — fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes — em assumir suas responsabilidades, deixando de priorizar ações de logística reversa (CNM, 2020);
- VII. A inexistência de regulamentações claras e específicas no Brasil para o descarte e reciclagem de resíduos fotovoltaicos, evidenciando a necessidade urgente de políticas públicas para o setor (MIRANDA et al., 2019).

Reconhecendo esses desafios, tramitam atualmente projetos de lei que buscam enfrentar a questão, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Projetos de Lei em Tramitação

Regulamentação	Situação em tramitação	Assunto
PL 2.940/2015	Apensado ao PL 2.045/2011.	Institui normas para o gerenciamento e destinação final do lixo eletrônico.
PL 7.652/2017	Apensado ao PL 3.732/2015.	Acrescenta artigo à Lei nº 12.305/2010, para dispor sobre a implantação de postos de recolhimento de lixo eletrônico
PL 90/2018	Em tramitação.	Altera a Lei nº 12.305/2010, para incluir no conteúdo mínimo do plano de gerenciamento de resíduos sólidos a destinação de materiais recicláveis descartados a cooperativas de

		catadores ou organizações da sociedade civil que tenham por finalidade o aproveitamento econômico desses materiais.
PL 5406/2019	Apensado ao PL 3.153/2019.	Dispõe sobre as responsabilidades dos grandes geradores de resíduos sólidos na gestão desses resíduos.
PL 2936/2021	Apensado ao PL 2.045/2011.	Estabelece normas para descarte de lixo eletrônico em condomínios residenciais, empresariais e comerciais e dá outras providências
PL 1.874/2022	Aprovada pelo plenário, submetida à Câmara dos Deputados em 21/03/2024.	Institui a Política Nacional de Economia Circular e altera a Lei nº 10.332/2001, a Lei nº 12.351/2010 e a Lei nº 14.133/2021, para adequá-las à nova política.
PL 3.784/2023	Aguardando audiência pública.	Altera a Lei nº 12.305/2010, para obrigar os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de painéis solares fotovoltaicos a estruturar e implementar sistemas de logística reversa.
PL 998/2024	Aguardando Designação de Relator(a) na Comissão de Desenvolvimento Urbano (CDU)	Institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos.

Fonte: Autoria própria – Adaptado de SANTOS et al., 2023.

5 CONCLUSÃO

O aumento significativo da adoção de sistemas fotovoltaicos trouxe à tona um desafio ambiental crucial: a gestão eficiente dos resíduos gerados pelo descarte de módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil. A reciclagem desses painéis é uma solução necessária para minimizar impactos ambientais e recuperar materiais valiosos, como silício, prata e vidro, que podem ser reintegrados no ciclo produtivo. Para atingir esse objetivo, são utilizadas diversas técnicas de reciclagem, incluindo os processos mecânicos, hidrometalúrgicos e térmicos, cada um com suas vantagens e desvantagens.

O processamento mecânico é um dos métodos mais comuns e envolve a trituração dos módulos para separar seus componentes. Sua principal vantagem é sua simplicidade e custo, porém tem como limitação não ter uma separação de todos os materiais com alta precisão.

O processamento hidrometalúrgico utiliza soluções químicas para extrair metais dos módulos fotovoltaicos, é um método eficaz para a recuperação de metais preciosos. Entretanto, o alto custo do processo, aliado ao risco de contaminação ambiental devido a utilização de soluções químicas são impeditivos de sua aplicação.

O processamento térmico, por sua vez, utiliza altas temperaturas para decompor o encapsulante EVA (etileno-vinil-acetato) dos módulos fotovoltaicos. Esta decomposição libera o silício, o vidro e outros materiais para recuperação, podendo ser uma técnica aplicada a grandes volumes de resíduos, trazendo agilidade ao processo. Porém, o alto consumo de energia para realizar a queima, bem como a emissão de gases tóxicos provenientes da combustão adiciona custos e complexidade ao processo.

No cenário brasileiro, a falta de uma regulamentação robusta e específica para a reciclagem de painéis fotovoltaicos agrava ainda mais os desafios, impedindo o desenvolvimento de uma infraestrutura eficaz para a gestão desses resíduos. Embora iniciativas globais, como a Diretiva Europeia 2012/19/EU, estabeleçam diretrizes claras e metas de reciclagem, o Brasil necessita de um marco regulatório mais assertivo e de políticas públicas que incentivem a conscientização e a adoção de práticas sustentáveis no setor.

Além disso, a implementação de uma economia circular no setor fotovoltaico requer a criação de sistemas eficientes de coleta, triagem e reciclagem, que não apenas minimizem os impactos ambientais, mas também otimizem o uso de recursos, contribuindo para a redução da demanda por matérias-primas raras e finitas. A viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos está intimamente ligada à evolução tecnológica e ao desenvolvimento de processos mais eficientes, que tornem a reciclagem uma opção competitiva em relação à produção de novos módulos.

Em suma, a transição para uma economia circular plena no setor fotovoltaico demanda uma integração entre inovação tecnológica, regulamentação e engajamento de todos os atores envolvidos, desde o setor público até a indústria e a academia. Somente com a implementação de um sistema eficaz de reciclagem será possível garantir a sustentabilidade do setor de energia solar fotovoltaica, alinhando o crescimento desta fonte de energia renovável com os princípios da economia circular e com as exigências ambientais globais.

REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482, 2012. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 05/04/2025.

ANDREOTTI, Jorge Ignacio. **PLANO SOLAR SAN JUAN- Fabricação de Painéis Solares**. Disponível em: <<http://ingenieroandreotti.blogspot.com.br/2013/01/plan-solar-sanjuan-fabricacion-de.html>>. Acesso em: 24/03/2025.

ANUSUYA, K.; VIJAYAKUMAR, K.; MANIKANDAN, S. **From Efficiency to Eternity: A Holistic Review of Photovoltaic Panel Degradation and End-of-Life Management**. *Solar Energy* 2023, 265, 112135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112135>.

BETTANIN, A. **O uso de tiosulfato para a recuperação de Prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. Trabalho de diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Agosto, 2017.

BRASIL. **Lei nº 12.305** de 2 de agosto de 2010. 2010. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20/03/2025.

BRASIL. **Acordo Setorial Eletroeletrônicos. 2019a.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 20/03/2025.

CHARLES, Rhys G.; DAVIES, Matthew L.; DOUGLAS, Peter. **Third generation photovoltaics—Early intervention for circular economy and a sustainable future.** Em: 2016 Electronics Goes Green 2016+(EGG). IEEE, 2016. p. 1-8.

CNM – Confederação Nacional de Municípios. **10 anos da PNRs: importância da logística reversa nos Municípios brasileiros.** 2020. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br>>. Acesso em: 24/03/2025.

COMEL, J. et al. **Use of phytic acid for selective precipitation of undesirable metals (Al, Fe, Pb) contained in the leachates from hydrometallurgical processes.** Journal of Environmental Chemical Engineering, Mets - France, April 2021.

CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações.** Centro de Referência para Energia Solar Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/bipv.php>>. Acesso em: 12 de março de 2025.

CÓDIGO de Catalogação Anglo-Americano. 2. ed. São Paulo: FEBAB, 1985.

CUI, J.; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review.** Journal of Hazardous Materials, v. 99, n. 3, p. 243–263, maio. 2003.

CUI, J.; ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review.** Journal of Hazardous Materials, v. 158, n. 2–3, p. 228–256. 30 out. 2008.

DIAS, P. et al. **Recycling waste crystalline silicon photovoltaic modules by electrostatic separation.** Journal of Sustainable Metallurgy, Porto Alegre - Brasil, Março 2018.

DIVYA, A., ADISH, T., KAUSTUBH, P., e ZADE, P. S. (2023). **Review on recycling of solar modules/panels.** Solar Energy Materials and Solar Cells, 253. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112151>

Official Journal of the European Commission. **Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste electrical and Electronic Equipment (WEEE): Official Journal of the European Commission.** 2012:L 197/38-71.

FTHENAKIS, J.K. Choi; H.C. Kim; D.E. Turney, **Life cycle greenhouse gasemissions of thin-film photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization,** J. Ind. Ecol. 16 (S1) (2012) S110–S121.

FUPENG, L. et al. **Recovery and separation of gallium(III) and germanium(IV) from zinc refinery residues: Part I: Leaching and iron(III) removal.** Hydrometallurgy, Changsha - China, March 2017.

GUIMARÃES, E.C. et al. Dos. **Solar energy paradigms and waste Generation.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 6, p. 59923-59940, 2021. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/31485>>. Acesso em 24/03/2025.

HARRISON, S. et al. Challenges for efficient integration of SHJ based solar cells in shingle module configuration. 37th EU PVSEC, p. 223-227, 2020.

HEBER, F.; SILVA, E. M, da. **Institucionalização da Política Nacional de Resíduos Sólidos: dilemas e constrangimentos na Região Metropolitana de Aracaju (SE)**. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 48, n. 4, p. 913-937, 2014. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rap/a/LydszDxFjhzVWHmgqH4ppXn/abstract/?lang=pt>>.

Acesso em: 24/03/2025.

HUANG, W.-H., SHIN, W. J., WANG, L., SUN, W.-C., e TAO, M. (2017). **Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules**. Solar Energy, 144, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001>

IRENA. **End-of-Life Management for Solar Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies**. Report IEA-PVPS T12-10, 2018. Disponível em: https://ieapvps.org/wpcontent/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf.

Acesso em: 08/03/2025.

ISHERWOOD, P. J. M. **Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling**. Sustainability 2022, 14 (3), 1676. <https://doi.org/10.3390/su14031676>.

ISILDARA, A. et al. **Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies**. Resources, Conservation & Recycling, Delft - Netherlands, October 2017.

JANYASUTHIWONG, S. et al. **Effect of operational parameters on the leaching efficiency and recovery of heavy metals from computer printed circuit boards**. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Delft - Netherlands , September 2015.

JIANG, W.; JIA, L.; ZHEN-MING, X. **A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board**. Journal of Hazardous Materials, Shanghai - China, Março 2008.

KALMYKOVA, Yuliya; SADAGOPAN, Madumita; ROSADO, Leonardo. **Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools**. Resources, Conservation and Recycling, v. 135, p. 190-201, 2017.

KASPER, A. C. et al. **Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper**. Waste Management, Porto Alegre - Brazil, September 2011.

KONZEN, B. A. D. V.; PEREIRA, A. F. **Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2020, Fortaleza. Anais [...], Fortaleza: CBENS, 2020.

LATUNUSSA Cynthia E.L., ARDENTE Fulvio, BLENGINI Gian Andrea, MANCINI Lucia. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels**. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability (IES), via Enrico Fermi 2749, 2012.

LEITÃO, Alexandra. **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc.XXI**. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting, v. 1, n. 2, 2015.

LIANG, X. et al. **A review of metallurgical processes and purification techniques for recovering Mo, V, Ni, Co, Al from spent catalysts.** Journal of Cleaner Production, Shenyang - China, September 2022.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão.** Revista Virtual de Química, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126 - 143, Outubro 2014.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. **Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework.** Journal of Cleaner Production, versão online, [S.l.], v.294, s.n., p. 126252, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/Science/article/abs/pii/S09596526221004728?via%3Dihub>>. Acesso em 24/03/2025.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. **Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia.** Resources, Conservation and Recycling, versão online, [S.l.], v. 146, s.n., p. 192-205, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919301454?via%3Dihub>>. Acesso em: 20/03/2025.

MAJEWSKI, P., AL-SHAMMARI, W., DUDLEY, M., JIT, J., LEE, S.-H., Myoung-Kug, K., & Sung-Jim, K. (2021). **Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory**

approaches. Energy Policy, 149. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>

MCDONALD, N.C.; PEARCE, J.M. **Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules.** Energy Policy, 2010; 38(11): 7041-7047.

MIRANDA, R.T.; LEANDRO, F. da S.; SILVA, T. C. **Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos.** Revista Brasileira de energias renováveis. Paraná, v.8, n.1, p. 364-383, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/53355>>. Acesso em: 24/03/2025.

MORAIS, C. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; LADEIRA, A. C. Q. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.** Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral, Belo Horizonte - Brazil, May 2014.

MULAZZANI, A.; ELEFThERiADIS, P.; LEVA, S. **Recycling C-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison.** Energies 2022, 15 (22), 8419. <https://doi.org/10.3390/en15228419>.

MULVANEY, D. **Solar Power: Innovation, Sustainability, and Environmental Justice.** Okland: University of California Press, 2019.

NILI, M., SEYEDHOSSEINI, S. M., JABALAMELI, M. S., e DEHGhani, E. (2021). **A multi-objective optimization model to sustainable closed-loop solar photovoltaic supply chain network design: A case study in Iran.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111428>

PAYET, Jérôme; GREFFE, Titouan. **Life Cycle Assessment of New HighConcentration Photovoltaic (HCPV) Modules and Multi-Junction Cells.** Energies, v. 12, n. 15, p. 2916, 2019.

PEREZ-GALLARDO, J. R.; AZZARO-PANTEL, C.; ASTIER, S. **A Multi-Objective Framework for Assessment of Recycling Strategies for Photovoltaic Modules**

Based on Life Cycle Assessment. Waste and Biomass Valorization 2017, 9 (1), 147–159. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9878-0>.

PUPIN, P.C. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida.** 2019. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

RAHMAN, F.; XU, W. (Eds.). Adv. Sol. Photovolt. Power Plants. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 287–317. 2016.

RAO, S. R. **High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels.** Amsterdam - Holanda: [s.n.], v. First Edition, 2006.

RIGO, P. D. et al. **Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil.** Renewable Energy, versão online, v.181, s.n., p.39-50, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014812101329X?via%3Dihub>>. Acesso em: 20/03/2025.

ROSA, G. M.; SILVA, F. R.; FLACH, K. A. **Educação Ambiental na educação escolar e a Responsabilidade Social: desafios e possibilidades nas questões ambientais.** Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 16, n. 5, p. 411–430, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/12043>>. Acesso em: 20/03/2025.

SANTOS, E. D.; BRANDÃO, L.M.; FREITAS, P.G. **Meio ambiente, tecnologias e demandas contemporâneas para o desenvolvimento sustentável.** Volume 1. Editora e-Publicar. 2023.

SEO, B.; KIM, J. Y.; CHUNG, J. **Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts.** Waste Management, Seoul - Korea, May 2021.

SILVA, F.S. et al (organizadores). **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro.** Aracaju- Sergipe. Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual, 2019. 316 p.

SILVA, R. M. D. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado. (Texto para Discussão n. 166), 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>>. Acesso em: 20/03/2025.

TEMBO, P. M.; SUBRAMANIAN, V. **Current Trends in Silicon-Based Photovoltaic Recycling: A Technology, Assessment, and Policy Review.** Solar Energy 2023, 259, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.009>.

TURKISH GOLD MINERS ASSOCIATION. Heap **Leaching Technique in Mining: Within the Context of Best Available Techniques (BAT).** Euromines. [S.l.], p. 36. 2012.

VEIT, H. M.; JUCHNESKI, N. C. D. F.; SCHERER, J. **Uso de separação gravimétrica na concentração de metais provenientes de sucatas de placas de circuito impresso.** Resvista Escola de Minas, Porto Alegre - Brazil, 2014.

WIDMER, R. et al. **Global perspectives on e-waste**. Environmental Impact Assessment Review, St. Gallen - Switzerland, April 2005.

WILLIAMS, J.; SHU, L. H.; FENTON, R. G. **Analysis of remanufacturer waste streams across product sectors**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 50, n. 1, p. 101–104, 2001.

XU, Y. et al. **Global status of recycling waste solar panels: a review**. Waste Management, versão online, [S.1.], v. 75, s.n., p. 450-458, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18300576?via%3Dihub>>. Acesso em: 24/03/2025.

YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Recovery of Metals from E-waste**. The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, v. 48, n. 3, p. 3–18, 2009.

ZHANG, L.; XU, Z. **A review of current progress of recycling Technologies for metals from waste electrical and electronic equipment**. Journal of Cleaner Production, Shanghai - China, April 2016.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap**. Resources, Conservation & Recycling, Luleå - Sweden, September 1997.

ZHANG, X. et al. **Oxidative acid leaching of indium phosphide waste and recovery of indium metal by cementation with aluminum**. Hydrometallurgy, Ma'anshan - China, July 2023.