



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
CAMPUS ARARANGUÁ
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Maria Eduarda Goss

**Políticas internacionais para o descarte de módulos fotovoltaicos: propostas
para o cenário nacional**

Araranguá

2024

Maria Eduarda Goss

**Políticas internacionais para o descarte de módulos fotovoltaicos: propostas
para o cenário nacional**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Energia.

Orientadora: Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra. em Administração de Empresas.

Araranguá

2024

Ficha de Identificação de obra.

Goss, Maria Eduarda

Políticas internacionais para o descarte de módulos fotovoltaicos: propostas para o cenário nacional /Maria Eduarda Goss ; orientadora, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, 2024.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. legislação para descarte. 3. Descarte de Módulos fotovoltaicos. 4. Políticas públicas. 5. reciclagem de sistemas solares. I. Madruga, Kátia Cilene Rodrigues . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Maria Eduarda Goss

**Políticas internacionais para o descarte de módulos fotovoltaicos: propostas
para o cenário nacional**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Rubipiara Cavalcante Fernandes, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira de Energia.

Carla de Abreu D'Aquino, Dra.
Coordenadora do Curso

Kátia Rodrigues Cilene Madruga, Dra.
Orientadora

Maria Eduarda Goss
Autora

Araranguá, 02 de dezembro de 2024.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica já se consolidou como uma das principais fontes renováveis no cenário energético, desempenhando papel essencial na transição para um futuro sustentável. Contudo, o crescimento da indústria solar traz um desafio emergente: o descarte adequado dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil. Esses módulos, compostos por materiais potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, contêm recursos valiosos que poderiam ser reciclados, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens. A falta de estratégias eficazes para o descarte pode causar sérios impactos ambientais e econômicos, destacando a necessidade de políticas públicas que orientem uma gestão segura e sustentável desses resíduos. Este trabalho busca identificar e analisar políticas públicas nacionais e internacionais voltadas para o descarte de módulos fotovoltaicos. Para isso, por meio de um estudo com abordagem qualitativa e exploratória, analisou-se as principais políticas internacionais e a legislação brasileira sobre o tema, comparando-as para propor soluções aplicáveis ao cenário nacional. Os resultados apontam a necessidade urgente de fortalecer as políticas nacionais, adotando modelos como o Sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor e iniciativas voluntárias, como o *National PV Recycling Program*, amplamente aplicados em outros países. Conclui-se que incentivos econômicos, maior conscientização pública e colaboração entre governo e setor privado são essenciais para alinhar o Brasil às melhores práticas internacionais, promovendo uma gestão eficaz dos resíduos fotovoltaicos e contribuindo para a economia circular e a mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: descarte de módulos fotovoltaicos; reciclagem de sistemas solares; políticas públicas, legislação para descarte.

ABSTRACT

Solar photovoltaic energy has already established itself as one of the leading renewable energy sources in the current energy landscape, playing a key role in the transition to a sustainable future. However, the growth of the solar industry brings an emerging challenge: the proper disposal of photovoltaic (PV) modules at the end of their life cycle. These modules, composed of materials potentially harmful to the environment, contain valuable resources that could be recycled, reducing dependence on virgin raw materials. The lack of effective disposal strategies can cause significant environmental and economic impacts, highlighting the need for public policies to guide the safe and sustainable management of these wastes. This study aims to identify and analyze national and international public policies related to the disposal of PV modules. Through a qualitative and exploratory approach, the study analyzed key international policies and Brazilian legislation on the subject, comparing them to propose solutions applicable to the national context. The results highlight the urgent need to strengthen national policies by adopting models such as the Extended Producer Responsibility (EPR) system and voluntary initiatives like the National PV Recycling Program, widely implemented in other countries. The study concludes that economic incentives, greater public awareness, and collaboration between the government and the private sector are essential to align Brazil with international best practices, promoting effective management of PV waste and contributing to a circular economy and environmental impact mitigation.

Keywords: Disposal of photovoltaic modules; recycling of solar systems; public policies, legislation for disposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de descarte de um módulo FV	19
Figura 2 - Diagrama das camadas de um módulo FV de silício convencional	20
Figura 3 - Capacidade FV instalada anual e por país	25
Figura 4 - Cronograma para atendimento de meta percentual a ser coletada e destinada anualmente	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de abordagens para a gestão de fim de vida útil	29
Quadro 2 - Resumo de regulamentos internacionais para descarte de módulos FV	32
Quadro 3 - Resumo de regulamentos nacionais para descarte de módulos FV	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição material de um módulo fotovoltaico.....	21
Tabela 2 - Previsão de descarte FV até 2050	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar
B2B - *Business-to-business*
B2C - *Business-to-consumer*
CdTe - Telureto de cádmio
CDU - Comissão de Desenvolvimento Urbano
CENELEC - Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica
CIS - Cádmio-índio-selênio
CPIA - *China Photovoltaic Industry Association*
ElektroG - Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
EOL - *End Of Life*
EPR - *Extended Producer Responsibility*
EUA - Estados Unidos da América
EVA - Etileno-vinil-acetato
FV - Fotovoltaico
GC - Geração Centralizada
GD - Geração Distribuída
GEE - Gases do efeito estufa
GW - GigaWatts
GWp - GigaWatt pico
HW - Resíduos perigosos
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
IEA - International Energy Agency
IRENA - International Renewable Energy Agency
ISE - Institute for Solar Energy Systems
LID - Light Induced Degradation
METI - Ministério da Economia, Comércio e Indústria
MIIT - Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da China
MOE - Ministério do Meio Ambiente
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PID - *Potential Induced Degradation*

PL - Projeto de Lei

PLANARES - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PV Cycle - Programa de Energia Solar Fotovoltaica dos Estados Unidos

RCRA - Lei de Conservação e Recuperação de Recursos

SEIA - *US Solar Energy Industries Association*

SEP - Sistema Elétrico Brasileiro

SFV - Sistema Solar fotovoltaico

SSI - *Solar Sustainability Initiative*

Stiftung EAR - Registro Nacional de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

TPU - Poliuretano Termoplástico

UE - União Europeia

WEEE - *Waste Electrical and Electronic Equipment*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. METODOLOGIA	17
3.1 IDENTIFICAÇÃO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS INTERNACIONAIS.....	17
3.2 IDENTIFICAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NACIONAIS.....	17
3.3 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DAS POLÍTICAS INTERNACIONAIS.....	17
3.4 DISCUSSÃO E PROPOSIÇÃO.....	18
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
4.1 IMPORTÂNCIA DE POLÍTICAS PARA A RECICLAGEM DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS.....	18
4.2 PARTES DE UM MÓDULO FOTVOLTAICO E PRINCIPAIS IMPACTOS.....	19
4.2.1 Moldura	21
4.2.2 Vidro	22
4.2.3 Encapsulante	22
4.2.4 Prata	22
4.2.5 Demais Componentes.....	23
4.3 PANORAMA MUNDIAL DO CRESCIMENTO DE ENERGIA SOLAR.....	23
4.4 PREVISÃO VOLUMÉTRICA DE DESCARTES FOTVOLTAICOS	25
5. RESULTADOS E ANÁLISE.....	28
5.1 POLÍTICAS INTERNACIONAIS PARA O DESCARTE DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS.....	28
5.2 POLÍTICAS NACIONAIS PARA O DESCARTE DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS	35
5.3 DISCUSSÃO DO CENÁRIO INTERNACIONAL.....	41
5.4 DISCUSSÃO E PROPOSTAS PARA O CENÁRIO NACIONAL.....	43
6 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura média do planeta, estimado em 0,5°C no último século e com previsão de aumento de até 4°C até o final deste século, provoca grandes mudanças climáticas, resultando em consequências catastróficas para os sistemas econômicos, sociais e ambientais. De acordo com cientistas, a principal causa dessa elevação é o aumento significativo dos gases do efeito estufa (GEE), em que o setor de geração de energia desempenha um papel central, sendo responsável por cerca de 73% das emissões globais, em grande parte devido ao uso de combustíveis fósseis na geração de energia (EPE, 2020).

A energia tem um valor imensurável para a sobrevivência da humanidade, promovendo o desenvolvimento econômico e o estilo de vida moderno. Conseqüentemente, a transição energética é necessária para transformar a matriz energética mundial, atualmente composta por 72% de combustíveis fósseis, em uma matriz focada em energias renováveis com baixa ou nenhuma emissão de carbono, garantindo a continuidade do desenvolvimento e do suprimento energético, ao mesmo tempo em que contribui para a desaceleração dos efeitos climáticos causados pelos GEE (Dos Santos, 2019).

Como fonte alternativa aos combustíveis fósseis para geração de eletricidade, a energia solar destaca-se por não causar poluição, ser compacta e ter baixo custo de manutenção. Estima-se que, se toda a energia solar disponível no planeta fosse aproveitada, seria possível suprir cerca de 180% do consumo energético mundial atual. Essa fonte limpa possui imenso potencial a ser explorado no Brasil, superando até mesmo países que atualmente lideram seu uso. Embora os custos iniciais ainda sejam elevados, a longo prazo, o investimento se torna vantajoso. As energias renováveis já se consolidaram como protagonistas no setor energético e continuam expandindo sua participação no mundo (Silva; Oliveira, 2022) (Silva; Araújo, 2022).

Dados da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), mostram que a quantidade de usinas solares fotovoltaicas no Brasil cresceu cerca de 150% ao ano na última década, representando cerca de 19,5% da matriz elétrica do país em agosto de 2024, com uma capacidade instalada de 46 GW na qual evitou a emissão de 55,6 milhões de toneladas de CO₂ na geração elétrica. Em 2023 a energia solar

ultrapassou a energia eólica, que ocupava o segundo lugar, perdendo apenas para as hidrelétricas. Esse crescimento é impulsionado principalmente pela Geração Distribuída (GD), acompanhada de mudanças na legislação, como a Lei nº 14300/2022, que trouxe avanços na segurança jurídica para os usuários de energia solar e regulamentações sobre tributações do Sistema Elétrico Brasileiro (SEP) juntamente com a Resolução Normativa Aneel nº 1000/2021 e a Resolução Normativa Aneel nº 1059/2023 (ABSOLAR, 2023).

Diante desse crescimento exponencial, a energia solar deixou de ser vista como uma fonte alternativa e já ocupa uma posição significativa na matriz energética, tanto global quanto no Brasil. Sob a perspectiva ambiental, seu uso pode gerar importantes benefícios e impactos para o meio ambiente e a sociedade, uma vez que se trata de uma fonte contínua e abundante.

Um sistema solar fotovoltaico possui uma vida útil considerável. Estudos indicam que um módulo fotovoltaico mantém uma eficiência de geração de cerca de 80% ao longo de 25 a 30 anos de uso. Essa eficiência se deve a dois fatores principais: o *Light Induced Degradation* (LID) ou Degradação Induzida pela Luz e o *Potential Induced Degradation* (PID) ou Degradação Induzida Potencial, que tratam, respectivamente, da perda de eficiência das células devido à oxidação do boro no *wafer* de silício cristalino tipo P e à diminuição na produção de energia por causa de uma queda induzida de tensão. Após esse tempo de vida útil, haverá uma diminuição drástica na geração de energia, sendo recomendada a troca do sistema para melhores resultados (Energês, 2023) (Prado, 2018).

Segundo estimativa da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), nas próximas décadas o Brasil terá cerca de 550 mil toneladas de descarte de sistemas solares. Pesquisas indicam que, mesmo após atingir seu tempo de vida útil, o sistema solar ainda é considerado altamente sustentável, já que a maior parte de sua composição é formada por materiais recicláveis, como metais raros, vidro e alumínio, com cerca de 90% de possibilidade de reaproveitamento em sua estrutura geral, tornando-o tão reciclável quanto uma lata de alumínio. (Canal Solar, 2021).

O Brasil ainda não conta com nenhuma legislação ou órgão específico responsável por regular e fiscalizar o destino dos componentes presentes nesses sistemas ao final de suas vidas úteis. A Lei nº 12.305 de 2010, junto de seus decretos

nº 10.240/2020 e 11.043/2022, dispõe sobre o descarte e a gestão de resíduos sólidos urbanos, estabelecendo objetivos, metas e ações que devem ser adotados. Essas legislações tem sido utilizadas pelo setor solar, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, para assegurar o descarte seguro dos componentes.

No contexto internacional, a União Europeia (UE) é uma das regiões mais comprometidas com a sustentabilidade e o descarte correto de equipamentos eletrônicos, incluindo sistemas solares fotovoltaicos. Desde 2012, são seguidas normas estabelecidas pela *Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE)*, que regulamentam a coleta e a reciclagem final adequada dos componentes. Na Austrália, embora não haja uma política pública específica para o descarte, existe um programa nacional em que o governo financia e exige que os próprios fabricantes assumam a responsabilidade pelo descarte adequado. A China, que lidera a produção de sistemas solares, até pouco tempo atrás não possuía incentivos para a reciclagem dos componentes. Todavia, em 2021, foi introduzido um plano de ação para promover a reciclagem de materiais provenientes de tecnologias emergentes, incluindo módulos fotovoltaicos.

Em resumo, muitos países estão desenvolvendo políticas para o descarte adequado de módulos solares, com a maioria exigindo que os fabricantes assumam a responsabilidade por esse descarte.

Nesse contexto, os estudos que identificam e analisam políticas públicas voltadas ao descarte dos sistemas solares são de grande relevância. Essas políticas podem garantir que os componentes sejam descartados de maneira segura e responsável, minimizando o impacto ambiental e os riscos à saúde humana. Além disso, esses estudos podem fornecer subsídios importantes para gestores públicos.

Considerando o cenário, acima exposto, apresenta-se na seção, a seguir, o objetivo do presente trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é identificar e analisar políticas públicas internacionais e nacionais voltadas para o descarte de módulos fotovoltaicos (FV).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar políticas públicas internacionais voltadas para o descarte de módulos FV.
- Identificar as políticas públicas nacionais voltadas para o descarte de módulos FV.
- Comparar e discutir semelhanças e diferenças entre os exemplos internacionais.
- Contribuir com análises para construção de políticas públicas nacionais para o descarte dos módulos fotovoltaicos.

3. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos realizou-se um estudo de carácter qualitativo e exploratórios que foi dividido em 4 etapas. Essas serão descritas na sequência.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS INTERNACIONAIS

Nesta etapa do estudo, foi realizada uma pesquisa detalhada da literatura científica, incluindo artigos, estudos acadêmicos, relatórios técnicos de organizações internacionais e outras fontes relevantes para obter dados referentes às políticas públicas internacionais voltadas para o descarte de módulos FV em diferentes países. Utilizou-se como plataforma de busca *SciSpace*, *google acadêmico* e *SciELO*. O período considerado para a coleta foi de março a setembro de 2024. Entre as palavras para a busca das publicações utilizou-se: políticas internacionais para descarte de módulos fotovoltaicos, setor fotovoltaico mundial, *photovoltaic module disposal*, *perspectives for solar energy*.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NACIONAIS

Nesta etapa do estudo, foram levantados dados referentes às legislações vigentes no Brasil que tratam do descarte de resíduos, com foco específico e aprofundado no descarte de módulos fotovoltaicos. A pesquisa buscou compreender como as normas e regulamentações nacionais abordam este tema.

3.3 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DAS POLÍTICAS INTERNACIONAIS

Nesta etapa, com base nos dados e informações coletadas, foram realizadas análises comparativas detalhadas entre as políticas públicas de diferentes regiões analisadas. O objetivo foi identificar similaridades, diferenças, pontos fortes e fragilidades em cada abordagem, com foco nas estratégias adotadas para o descarte de módulos fotovoltaicos. Essa análise permitiu destacar boas práticas e potenciais

desafios que podem servir como referência para a formulação ou adaptação de políticas públicas no contexto nacional.

3.4 DISCUSSÃO E PROPOSIÇÃO

Nesta etapa, considerando a análise comparativa, procurou-se discutir algumas possibilidades para a construção de políticas públicas no Brasil.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste estudo apresenta os principais conceitos relacionados a políticas e práticas relacionados à gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos.

4.1 IMPORTÂNCIA DE POLÍTICAS PARA A RECICLAGEM DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A energia proveniente de sistemas solares é uma das tecnologias mais promissoras para melhorar a segurança energética e mitigar as mudanças climáticas. O mercado fotovoltaico está crescendo rapidamente e espera-se uma expansão ainda maior em escala global. Além dos impactos positivos da energia fotovoltaica na segurança energética e no combate às mudanças climáticas, ela se destaca como uma das tecnologias mais sustentáveis entre todas as formas de geração de energia, especialmente quando avaliada sob a ótica do ciclo de vida, incluindo a gestão de seu fim de vida útil. Com o crescimento exponencial dos sistemas fotovoltaicos (SFV), o número de módulos que atingirão o fim de sua vida útil também aumentará, acumulando-se como resíduos após o período de operação (IEA, 2022, tradução própria).

Quando um produto não pode ser reparado ou reutilizado, a reciclagem torna-se a opção preferencial antes do descarte final como lixo. Para manter a energia fotovoltaica na posição de tecnologia de energia limpa, a reciclagem de módulos fotovoltaicos emergiu como um tópico estratégico e de grande relevância. Nos últimos

anos, inúmeras atividades globais, regionais e locais têm sido conduzidas por governos, organizações e empresas para promover a reciclagem e desenvolver soluções sustentáveis para os resíduos fotovoltaicos (IEA, 2022, tradução própria).

4.2 PARTES DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO E PRINCIPAIS IMPACTOS

Entre todos os resíduos gerados pelos sistemas fotovoltaicos ao final de sua vida útil, os módulos descartados são a maior preocupação devido ao grande volume produzido. No entanto, todos os componentes do sistema também merecem atenção por conta das características específicas dos resíduos gerados. Isso é especialmente relevante para os elementos que compõem os inversores de corrente, que contêm elementos químicos raros e, em alguns casos, apresentam riscos à saúde. Além disso, a extração desses componentes deve ser realizada de forma cuidadosa para evitar danos, garantindo a preservação do valor intrínseco e da pureza dos materiais recuperados (Sousa, 2021).

O pré-tratamento dos módulos fotovoltaicos ao *fim de sua vida útil* (EOL) é essencial para otimizar a recuperação tanto do valor quanto da quantidade dos materiais. Os métodos de tratamento de resíduos de EOL incluem processos físicos, químicos e combinações de ambos (Jayapradha; Barik, 2023, tradução própria).

Figura 1 - Ciclo de descarte de um módulo FV

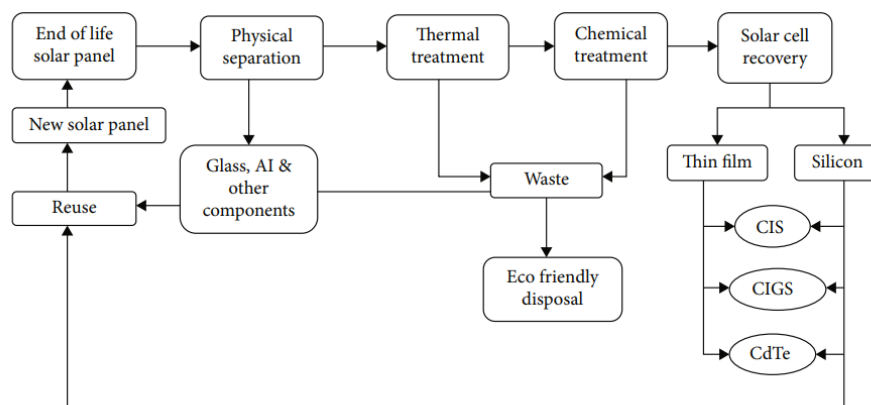
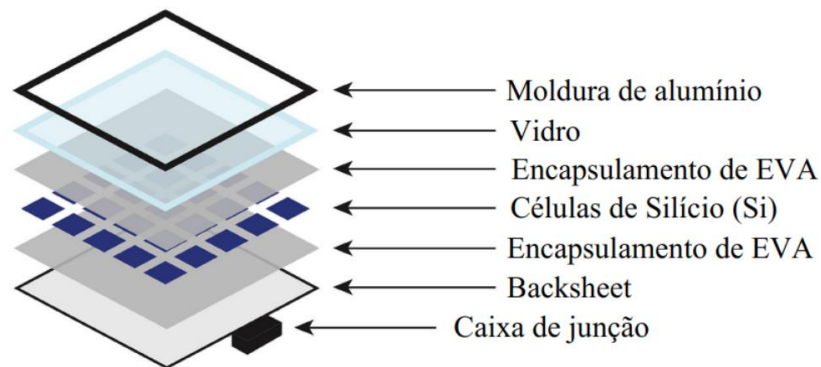


FIGURE 4: Layout for segregation and disposal of dead solar panels.

Fonte: Jayapradha; Barik (2023)

A célula fotovoltaica representa menos de 5% da massa total de um módulo fotovoltaico, de acordo com Latunussa (2016). Devido à necessidade de operar em ambientes externos, os módulos são projetados para resistir a condições climáticas variadas e adversas. Para alcançar essa resistência, as células de um módulo FV são encapsuladas entre camadas de vidro e polímeros flexíveis, que são posteriormente fixadas em uma estrutura de alumínio (Bomgardner; Scott, 2022).

Figura 2 - Diagrama das camadas de um módulo FV de silício convencional



Fonte: Silva; Varella (2024)

Essa construção protege as células contra interferências externas e permite um desempenho eficiente. Dentro dos sistemas fotovoltaicos, há também a presença de elementos como prata, cobre, chumbo e estanho, que desempenham diversas funções. Além do silício, esses materiais são considerados raros e valiosos, devendo ser idealmente recuperados e reciclados para novos usos. No entanto, a complexidade dos materiais compactados e interconectados nos *designs* modernos de módulos FV dificulta a separação e a reciclagem desses componentes (Tan; Jia; Ramakrishna, 2022, tradução própria).

Tabela 1 - Composição material de um módulo fotovoltaico

Material	Quantity (kg)	Unit (wt/wt%)
Vidro (contendo antimônio 0,01–1%/kg de vidro)	700	70%
Estrutura de alumínio	180	18%
Conector de cobre	10	1%
Camada de encapsulamento de adesivo à base de polímero (EVA)	51	5.1%
Camada de fundo (à base de fluoreto de polivinila)	15	1.5%
Célula solar de silício metálico	36.5	3.56%
Prata	0.53	0.053%
Alumínio (condutor interno)	5.3	0.53%
Cobre (condutor interno)	1.14	1.14%
Vários metais (estanho, chumbo)	0.53	0.053%
Total	1000	100%

Fonte: Adaptado de Tan; Jia; Ramakrishna (2022)

De acordo com Nelson M. de Souza (2021), os módulos fotovoltaicos são compostos pelas seguintes principais partes recicláveis: moldura, vidro, encapsulante, prata e demais componentes. A seguir, essas partes são detalhadas.

4.2.1 Moldura

A moldura do módulo fotovoltaico, que suporta toda a estrutura do módulo, é feita de alumínio anodizado e corresponde a cerca de 18% da massa total do módulo, conforme Lautnussa; *et al.* (2016). A reciclagem do alumínio utilizado na moldura oferece inúmeras vantagens, pois é um processo sustentável e com práticas consolidadas que permitem a reciclagem repetida do material sem perda de suas propriedades físicas. Além disso, o processo de reciclagem do alumínio consome cerca de 90% menos energias quando comparado à produção de alumínio a partir da matéria-prima virgem. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o alumínio é o metal com a maior taxa de reciclagem no Brasil. Essas informações destacam a reciclagem do alumínio como extremamente benéfica para o meio ambiente, já que evita que esses materiais acabem em aterros sanitários ou lixões após o uso.

4.2.2 Vidro

O vidro, dentro de um horizonte de 80 anos referente à escala de vida humana, minimamente se decompõe. Composto aproximadamente 70% da massa total de um módulo fotovoltaico, o vidro representa a maior parte dos resíduos gerados no descarte desses sistemas. Portanto, sua reciclagem ou reutilização oferece uma contribuição significativa para o meio ambiente, fomentando a sustentabilidade ao evitar que esses resíduos sejam destinados a aterros sanitários, lixões ou despejados em locais inadequados como entulho. A reciclagem ou reutilização do vidro é altamente vantajosa do ponto de vista econômico, pois resulta em uma significativa economia de energia. Além disso, promove a geração de serviços e empregos na cadeia de reciclagem de vidro, beneficiando cooperativas de catadores e recicladores.

4.2.3 Encapsulante

Com um percentual de massa total de cerca de 5,1% de um módulo fotovoltaico, o encapsulante é um dos principais fatores que influenciam o fim de vida útil dos módulos, pois contribui para a redução do rendimento do sistema em até 80%. Na maioria dos casos, o etileno-vinil-acetato (EVA) é utilizado como encapsulante. No entanto, recentemente, outros materiais, como poliuretano termoplástico (TPU), polivinil butiral e compostos à base de silicone, têm ganhado espaço. A degradação do encapsulante ocorre principalmente devido à exposição à radiação ultravioleta, que provoca o amarelamento do material e diminui a absorção da luz solar. O encapsulante tem como principais funções fixar as camadas de células fotovoltaicas à estrutura do módulo, além de proporcionar vedação e proteção contra fenômenos climáticos.

4.2.4 Prata

A prata é um componente que, embora represente uma porcentagem insignificante da massa total do módulo fotovoltaico, possui um valor econômico significativo devido à sua raridade e à limitada ocorrência em poucos países ao redor do mundo. Na maioria dos casos, esse mineral é obtido como subproduto de outros

minerais encontrados na natureza. No Brasil, as ocorrências de prata são extremamente limitadas. Dado o caráter raro da prata e sua presença nos resíduos dos módulos fotovoltaicos descartados, a recuperação desse metal torna-se crucial. Atualmente, existem diversas tecnologias disponíveis para a extração de prata a partir desses módulos, e devido ao seu elevado valor econômico, há um crescente interesse, especialmente entre empresas asiáticas, em recuperar prata de módulos fotovoltaicos e materiais eletrônicos em geral. No Brasil, a indústria de recuperação ou reciclagem de prata é praticamente inexistente, levando à exportação de resíduos de materiais eletrônicos para outros países, onde a recuperação de elementos raros é realizada.

4.2.5 Demais Componentes

De acordo com Xu; *et al.* (2018), é viável recuperar e/ou reciclar o silício e os metais raros presentes nos módulos fotovoltaicos, possibilitando a criação de uma cadeia de valor econômico completa que abrange todas as etapas do ciclo de vida do produto. Existem diversos métodos disponíveis, desde processos mecânicos até técnicas químicas que utilizam ácidos, solventes alcalinos e compostos orgânicos para dissolver ou remover o encapsulante EVA.

Após a etapa de moagem mecânica dos painéis fotovoltaicos, são implementados processos hidrometalúrgicos para recuperar materiais como índio e gálio. Materiais como telureto de cádmio (CdTe) e CIS (cádmio-índio-selênio) provenientes de painéis de filme fino são reciclados por meio de processos físico-químicos e, em alguns casos, mecânicos. Essas etapas incluem técnicas como moagem e flotação, além de métodos de processamento mecânico a seco, como o uso de jato de vácuo (Sousa, 2021)

4.3 PANORAMA MUNDIAL DO CRESCIMENTO DE ENERGIA SOLAR

A energia solar se popularizou e tornou-se mais acessível nos Estados Unidos durante a última década, período no qual o custo de instalação dos sistemas caiu mais de 70%. Esse declínio foi impulsionado principalmente pela implementação

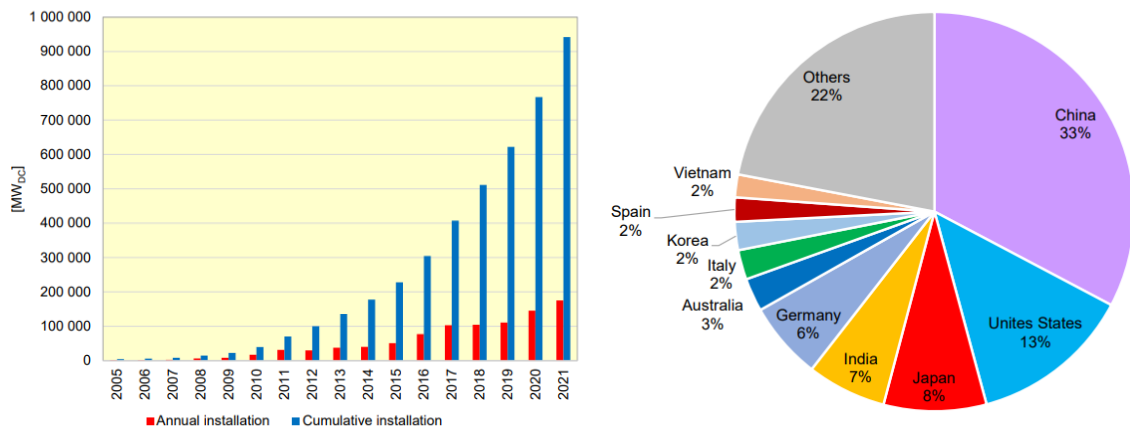
de políticas públicas favoráveis, como a redução de impostos, que visavam apoiar o desenvolvimento de tecnologias para produção de energia sustentável. Como resultado, a capacidade de geração solar aumentou de 0,34 GW em 2008 para 97,2 GW em 2022. Atualmente, cerca de 3% da produção de eletricidade nos EUA provém de energia fotovoltaica e solar térmica, o suficiente para abastecer 19 milhões de lares americanos. Outros países da América do Norte, também deverão contribuir para o aumento da geração de energia solar (Aqlan, Van Der Vindt, 2023).

Na Europa, a energia solar fotovoltaica desempenha um papel crucial na transição energética alemã, com o objetivo de atingir metas de geração de eletricidade com baixas emissões de carbono. Até o final de 2020, a Alemanha possuía aproximadamente 67 GWp de potência instalada, conforme estimativas do *Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar* (ISE). Com a revisão da Lei de Fontes de Energia Renovável da Alemanha em 2023, as metas de expansão da energia solar foram aumentadas para 215 GWp até 2030 e 400 GWp até 2040. Outros países europeus, como a Itália e a Espanha, contribuirão significativamente para os resíduos solares fotovoltaicos no futuro (IEA, 2024, tradução própria) (ISE, 2023, tradução própria).

A África e a América Latina também deverão observar um aumento na geração de resíduos de módulos fotovoltaicos, com a África do Sul e o Brasil liderando a implementação da energia solar nessas regiões. Outros mercados em crescimento constante até 2030 incluem Coreia do Sul, Austrália e Índia (IEA, 2022, tradução própria).

Mundialmente, a potência instalada total atingiu aproximadamente 175 GW/ano em 2021, levando a uma capacidade acumulada de 942 GW até 2021. Além dos maiores mercados de energia solar, como China, Estados Unidos, Japão e países da Europa, Índia, Austrália, Coreia e Vietnã recentemente expandiram a sua capacidade instalada de sistemas FV, conforme pode ser verificada na Figura 3 (IEA, 2022, tradução própria).

Figura 3 - Capacidade FV instalada anual e por país



Fonte: IEA (2022)

Apesar do crescimento acentuado da energia solar fotovoltaica em nível global, essa tecnologia tem um histórico relativamente recente no Brasil em comparação com outros países. Os dados indicam que a primeira usina fotovoltaica de 1 MW foi instalada em 1982 nos Estados Unidos, já no Brasil, a primeira usina fotovoltaica surgiu apenas em 2011, na região com maior potencial de geração, o Nordeste, localizada a 360 quilômetros da capital Fortaleza, no município de Tauá, no sertão do Ceará. Com capacidade inicial de 1 megawatt e 4.680 painéis fotovoltaicos, a usina marcou um importante passo para o desenvolvimento da energia solar no país (Beigelman, 2013) (Solar Power Authority, 2020).

4.4 PREVISÃO VOLUMÉTRICA DE DESCARTES FOTOVOLTAICOS

As projeções para o volume de descarte de painéis fotovoltaicos até 2050 são influenciadas por uma combinação de avanços tecnológicos, alterações regulatórias e esforços governamentais que podem modificar significativamente as previsões atuais. A China, como principal produtora e instaladora de painéis solares no mundo, deverá lidar com um grande volume de resíduos. No entanto, esse impacto pode ser mitigado com a aplicação de novas tecnologias de reciclagem. Recentemente, a Trina Solar, uma empresa chinesa, revelou o desenvolvimento do primeiro painel fotovoltaico de silício cristalino completamente reciclado, com a utilização de 37 tecnologias patenteadas que permitem separar e reutilizar componentes como silício,

alumínio, vidro e prata dos módulos descartados, resultando na criação de um novo painel funcional e eficiente. Esta inovação mostra que é possível recuperar materiais valiosos dos painéis descartados, mantendo a eficiência e potência dos novos produtos, o que pode influenciar as estimativas ao reduzir o volume de resíduos gerados (IRENA, 2016, tradução própria) (Kahana, 2024, tradução própria).

Na União Europeia, a atualização da Diretiva WEEE em 2022, que inclui diretrizes específicas para painéis solares, tem o potencial de aumentar a taxa de recuperação de materiais e reduzir o volume projetado de resíduos. Como um dos pioneiros na instalação em larga escala de painéis solares, a Alemanha, segundo o relatório de 2016 da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e do Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica, será provavelmente o primeiro país a lidar com volumes significativos de resíduos fotovoltaicos, com expectativa de que essa quantidade aumente consideravelmente nos anos seguintes ao relatório (IEA, 2024, tradução própria).

O Brasil, com sua rápida expansão no setor solar, deve gerar um volume considerável de resíduos. No entanto, a evolução das políticas locais e os investimentos em infraestrutura para reciclagem poderão mitigar esse impacto. Na Índia, novas tecnologias de reciclagem e iniciativas governamentais que promovem a sustentabilidade são fundamentais para enfrentar o aumento de resíduos. A Austrália e a Coreia do Sul precisarão avançar em soluções de reciclagem para gerenciar o crescimento dos resíduos fotovoltaicos, enquanto o Japão continuará enfrentando desafios no manejo sustentável, mesmo com suas regulamentações rigorosas (Yu; *et.al.*, 2022, tradução própria).

Esses fatos e tendências não apenas fornecem uma base sólida para as previsões atuais, mas também destacam a dinâmica em constante mudança do setor de energia solar e a gestão de resíduos. Com a implementação de novas tecnologias e políticas, é provável que as estimativas de volume de resíduos e as estratégias de gestão evoluam para refletir essas mudanças. A Tabela 2, apresentada abaixo, mostra a previsão de volume de descarte dos sistemas solares em alguns países.

Tabela 2 - Previsão de descarte FV até 2050

País	Volume Previsto de Descarte até 2050 (Toneladas)
Vietnã	1M
Brasil	0.75M
Coreia	2,3M
Austrália	0.95M
Índia	7,5M
Japão	7,6M
Estados Unidos (EUA)	10M
Países da Europa	12M
China	20M

Fonte: Adaptado de IRENA (2016)

Para garantir a sustentabilidade, é crucial estabelecer procedimentos eficazes para o descarte e reciclagem dos resíduos previstos em grandes quantidades nas próximas décadas, assegurando a destinação adequada dos materiais presentes no sistema. Além disso, será necessário expandir as capacidades de reciclagem para atender a demanda futura, juntamente com o investimento em qualificação profissional e infraestrutura adequada para assegurar o tratamento dos resíduos de acordo com os processos de reciclagem estabelecidos. (IEA, 2024, tradução própria).

5. RESULTADOS E ANÁLISE

Considerando os objetivos propostos, a seguir são apresentados os resultados, ou seja, as Políticas Internacionais e Nacionais identificadas, assim como as respectivas análises.

5.1 POLÍTICAS INTERNACIONAIS PARA O DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O crescente uso de energia solar fotovoltaica como fonte de energia limpa e renovável tem impulsionado o aumento da produção e do descarte de módulos fotovoltaicos. O descarte inadequado desses painéis pode resultar em riscos ambientais significativos devido à presença de materiais tóxicos, como o chumbo, cádmio e selênio. Para enfrentar essa questão, políticas internacionais têm sido elaboradas para regular o descarte seguro e sustentável dos módulos fotovoltaicos (Scolla, 2020).

Com o crescimento do setor fotovoltaico, o número de módulos que atingirão o fim de sua vida útil deve aumentar, impulsionando a necessidade de políticas públicas para o descarte adequado. Na China, líder de mercado, prevê-se a geração de 20 milhões de toneladas de resíduos até 2050, mas inovações em reciclagem podem reduzir esse volume em até 95%. Na União Europeia, a atualização da Diretiva WEEE promete melhorar a recuperação de materiais, com a Alemanha lidando com até 1 milhão de toneladas até 2030. Brasil e Índia também enfrentam desafios semelhantes, mas políticas de reciclagem podem mitigar seus impactos (IEA, 2022, tradução própria).

Existem diversas abordagens para a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos no fim de sua vida útil, conforme apresentado no Quadro 1. Nas subseções seguintes, serão examinados em detalhes os exemplos de abordagens público-privadas e regulatórias, com base nos estudos de Yu; *et al.*, 2022.

Quadro 1 - Tipos de abordagens para a gestão de fim de vida útil

Abordagens para Gestão de Resíduos (Reciclagem)		Exemplos
Voluntário	<ul style="list-style-type: none"> • Baseado em ações voluntárias dos produtores para assumir a responsabilidade pelo EOL dos módulos fotovoltaicos; • Comumente estabelecido por meio de sistemas internos de gestão ambiental; • Pode ser gerido diretamente pelos fabricantes, oferecendo suas próprias operações de reciclagem, ou indiretamente, através de terceiros (prestadores de serviços contratados, outros produtores ou entidades governamentais) para coletar e reciclar os módulos FV em desuso. 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 14000; • Programas voluntários individuais de devolução; • Programa de Coleta e Reciclagem da First Solar. • <i>Solar Sustainability Initiative – SSI</i> • <i>National PV Recycling Program</i>
Público-privado	<ul style="list-style-type: none"> • Uma parceria público-privada entre indústrias de FV e reguladores; • Fabricantes do mercado de FV estabelecem uma associação que financia a coleta e reciclagem dos módulos com apoio governamental; • Ampliação da área de cobertura do sistema de coleta e reciclagem FV. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>PVCycle</i>; • <i>RETRIEVE Project</i>.
Regulatório	<ul style="list-style-type: none"> • Regulamentações e políticas específicas são desenvolvidas para lidar com os módulos FV no EOL; • Determina a coleta e a reciclagem de módulos FV pelos próprios produtores do mesmo. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>European Union Directive (WEEE)</i>

Fonte: Adaptado e traduzido de Yu; *et.al.* (2022)

A UE adota uma abordagem proativa na gestão de resíduos eletrônicos, incluindo módulos fotovoltaicos, por meio da Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos. Essa política exige que os produtores sejam responsáveis pelo tratamento adequado dos resíduos gerados por seus produtos, com base no princípio da Responsabilidade do Produtor. Assim, qualquer produtor de módulos fotovoltaicos que deseje comercializar seus produtos nos estados membros da UE é legalmente

obrigado a realizar a gestão responsável do fim de vida útil de seus módulos fotovoltaicos (Yu; *et al.*, 2022, tradução própria).

A Diretiva WEEE estabelece metas anuais de coleta e reciclagem e proíbe o uso de substâncias perigosas em equipamentos eletrônicos. Ademais, ela promove a responsabilidade compartilhada ao longo da cadeia de valor, incentivando a recuperação de materiais valiosos e a minimização dos impactos ambientais (Silveira; Junior, 2022).

Cabe também ressaltar que os produtores de módulos fotovoltaicos devem fornecer informações detalhadas sobre os procedimentos corretos de fim de vida útil para compradores e empresas de tratamento de resíduos, a fim de prevenir a disposição inadequada e os riscos associados a vazamentos de materiais perigosos e riscos ocupacionais. Para apoiar essa gestão, o Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC) desenvolveu normas, como a EN50625-2-4, que especificam requisitos administrativos, organizacionais e técnicos para a coleta, logística e tratamento de resíduos de módulos fotovoltaicos (Yu; *et al.*, 2022, tradução própria).

A Diretiva WEEE também estabelece uma estrutura de financiamento para a coleta e reciclagem desses módulos, considerando transações B2C (*business-to-consumer*) e B2B (*business-to-business*). A diretiva oferece flexibilidade aos estados membros da UE na definição das obrigações financeiras e inclui requisitos mais rigorosos para a gestão do fim de vida dos módulos fotovoltaicos (Sharma; Pandeyb; Kohle, 2019, tradução própria).

Também na Europa, o *Programa de Energia Solar Fotovoltaica* (PV Cycle), uma organização sem fins lucrativos fundada em 2007 por fabricantes de módulos fotovoltaicos, promove a conformidade com as regulamentações WEEE e incentiva a reciclagem de módulos fotovoltaicos (Xu; *et al.*, 2018). Esse programa, baseado em parcerias público-privadas, responsabiliza seus membros pelo financiamento da coleta e reciclagem através de uma contribuição anual e uma taxa variável, determinada pela participação no mercado fotovoltaico do ano anterior. O programa busca aumentar a conscientização sobre o descarte adequado, estabelecer padrões de reciclagem e criar uma infraestrutura para o gerenciamento sustentável de resíduos

fotovoltaicos, oferecendo orientações técnicas, treinamento e certificação para empresas de reciclagem (Yu; *et al.*, 2022, tradução própria).

Para atingir seus objetivos, a organização mapeia os módulos FV em fim de vida e garante a reciclagem e recuperação adequadas dos materiais, colaborando com diversos parceiros em projetos de pesquisa e desenvolvimento que impulsionam avanços tecnológicos nos serviços de tratamento de resíduos (Yu; *et al.*, 2022, tradução própria).

A *Solar Sustainability Initiative* é uma colaboração global entre governos, indústrias e a sociedade civil para promover práticas sustentáveis na indústria solar fotovoltaica. Esta iniciativa apoia a transição para uma economia circular, estimulando a reciclagem e a reutilização de módulos, desenvolvendo padrões de sustentabilidade, compartilhando boas práticas e criando parcerias estratégicas para melhorar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais (Solar Power Portal, 2023, tradução própria).

Nos Estados Unidos, o *SEIA (Solar Energy Industries Association)* tem um Programa Nacional de Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos (*National PV Recycling Program*). Com o intuito de estabelecer e implementar padrões de reciclagem para promover uma economia circular no setor fotovoltaico dos EUA, compõe-se de uma rede de recicladores e provedores de condicionamento que são aprovados pelo SEIA após um rigoroso processo de auditoria. A auditoria avalia os procedimentos, as tecnologias utilizadas e a conformidade regulatória, garantindo que os materiais recuperados sejam reintroduzidos na cadeia de suprimentos de maneira eficaz. Através do programa, o SEIA também promove o uso de tecnologias avançadas para garantir a extração de quase 100% dos materiais valiosos dos painéis reciclados, como prata, silício, cobre, alumínio e vidro (Fischer, 2024, tradução própria).

No Quadro 2, apresenta-se um resumo da análise das políticas e regulamentações internacionais relacionadas ao descarte de resíduos, com foco especial nos resíduos fotovoltaicos.

Quadro 2 - Resumo de regulamentos internacionais para descarte de módulos FV

(continua)

Países	Regulamentações Específicas para Resíduos de Módulos Fotovoltaicos e/ou Outras Políticas e Programas Similares
<p>Austrália</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sem regulações específicas para SFV's; • o <i>Solar PV Recycling Scheme</i> está sendo desenvolvido, com foco em uma abordagem de responsabilidade compartilhada entre os fabricantes e os reguladores; • O Governo do estado de Victoria proibiu o despejo de resíduos eletrônicos em aterros desde 2014; • O Governo australiano conta com a política <i>National Waste Policy Action Plan</i>, que inclui a gestão de resíduos de equipamentos eletrônicos, incluindo painéis solares. Este plano visa melhorar a reciclagem e a recuperação de recursos de produtos no final de sua vida útil, com ênfase em sistemas fotovoltaicos; • Existem projetos de pesquisa e parcerias entre universidades e empresas, além de ações para aumentar a conscientização sobre a importância da reciclagem de sistemas FV.
<p>China</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lei de Prevenção e Controle da Poluição Ambiental Sólida (2004) onde estabelece diretrizes gerais para a gestão de resíduos sólidos, incluindo a responsabilidade dos fabricantes na coleta e reciclagem de produtos, incluindo módulos FV; • Publicadas pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT) em 2020, inclui-se diretrizes mais detalhadas focadas no gerenciamento de EOL de módulos FV, incluindo direções para processos de reciclagem de baixo custo e baixo consumo energético; • Em 2017, foram emitidos pela CPIA (<i>China Photovoltaic Industry Association</i>) requisitos técnicos gerais para a reciclagem e reutilização de módulos c-Si pela Associação da Indústria Fotovoltaica da China, e em 2021 para módulos de filme fino; • Em 2023, o governo chinês e a CPIA introduziram normas adicionais mais rigorosas para padronizar e regulamentar os processos de reciclagem, aumentando a ênfase na sustentabilidade e na eficiência dos métodos de reciclagem.

Quadro 2 - Resumo de regulamentos internacionais para descarte de módulos FV

(continuação)

<p>União Europeia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alemanha sob a diretiva WEEE da UE possui taxa de recuperação/reciclagem de 85%/80% necessária, transposta para a legislação alemã por meio de uma revisão da Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (<i>ElektroG</i>), regulamentada pelo Registro Nacional de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (<i>Stiftung EAR</i>); • A <i>Solar Sustainability Initiative</i> é uma colaboração global para promover práticas sustentáveis na indústria solar, focando em reciclagem e reutilização de módulos solares; • <i>PVcycle</i> atua com uma abordagem voluntária de apoio e gestão.
<p>Índia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os módulos fotovoltaicos descartados são cobertos e geridos pela regulamentação geral de resíduos, <i>E-Waste (Management) Rules</i> de 2016; • Sem políticas específicas para FV.
<p>Estados Unidos (EUA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os módulos FV são descartados com base na <i>Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA)</i>; • Muitos estados têm suas próprias leis sobre a reciclagem de resíduos eletrônicos e alguns específicos de FV, como o Projeto de Lei do Senado 489 na Califórnia que autoriza a mudança na classificação dos painéis solares de <i>resíduos perigosos (HW)</i> para resíduos universais e o Projeto de Lei sobre Incentivos Solares 5939 no estado de Washington que exige que os fabricantes de sistemas ofereçam programas de coleta e reciclagem para módulos FV; • O <i>National PV Recycling Program</i> foi lançado pela Associação de Indústrias de Energia Solar dos EUA (SEIA), que facilita as operações de reciclagem FV e gera trabalho para recicladores.
<p>Vietnã</p>	<ul style="list-style-type: none"> • O Vietnã utiliza a Lei de Gestão de Resíduos Sólidos com seus decretos para a gestão de resíduos, mas não possui regulamentações específicas para resíduos FV.
<p>Coreia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Possui em desenvolvimento uma nova legislação para resíduos FV em EOL que incluirá um sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor; • Os resíduos FV são incluídos no Regulamento de Aplicação da Lei de Controle de Resíduos da Coreia do Sul (Lei nº 14783); • Possui projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para tecnologias de reciclagem e criação de um centro de reciclagem de módulos FV.

Quadro 2 - Resumo de regulamentos internacionais para descarte de módulos FV
(conclusão)

Japão	<ul style="list-style-type: none"> • Os resíduos de sistemas fotovoltaicos são regulados pelo quadro geral de gestão de resíduos, conforme estabelecido pela Lei de Gestão de Resíduos e Limpeza Pública; • O <i>Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI)</i> e o <i>Ministério do Meio Ambiente (MOE)</i> desenvolveram em conjunto um roteiro e diretrizes para promover a gestão adequada do fim da vida útil dos equipamentos de energia renovável como os sistemas FV.
--------------	--

Fonte: Adaptado e traduzido de Yu; *et.al* (2022)

A gestão adequada do descarte de módulos fotovoltaicos é essencial para minimizar impactos ambientais e fomentar a transição para uma economia circular. A União Europeia destaca-se com a Diretiva WEEE, que promove a reciclagem e a reutilização, estabelecendo metas claras de recuperação no caso da Alemanha. Na Austrália, embora não existam regulamentações específicas para resíduos fotovoltaicos, iniciativas como o *National Waste Policy Action Plan* e a proibição de resíduos eletrônicos em aterros no estado de Victoria refletem esforços para aprimorar a recuperação de recursos. Nos Estados Unidos, o gerenciamento de resíduos segue a Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (*RCRA*), complementada por ações estaduais como o Projeto de Lei 489 na Califórnia e o *National PV Recycling Program*, coordenado pela SEIA.

Outros países também apresentam abordagens diversificadas. A China, desde 2020, adota diretrizes para reciclagem sustentável de módulos fotovoltaicos, enquanto Índia e Vietnã utilizam regulamentações gerais, sem disposições específicas para esse tipo de resíduo. A Coreia do Sul está desenvolvendo legislação voltada ao Sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor, enquanto no Japão, o METI e o MOE estabeleceram diretrizes para orientar a gestão do fim da vida útil de sistemas fotovoltaicos.

Essas, entre outras políticas destacadas no Quadro 2, representam os esforços dos distintos países para regulamentar o descarte seguro e sustentável desses resíduos. Essas políticas promovem a responsabilidade compartilhada,

estabelecem metas de reciclagem, incentivam a inovação e fomentam parcerias estratégicas para enfrentar os desafios relacionados aos resíduos fotovoltaicos.

5.2 POLÍTICAS NACIONAIS PARA O DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

As políticas públicas são ações governamentais destinadas a atender necessidades específicas da sociedade, abrangendo áreas como saúde, educação e infraestrutura. Normalmente formuladas de maneira hierárquica, essas políticas buscam alinhar os papéis e expectativas das partes interessadas, promovendo o desenvolvimento econômico e social. Para serem eficazes, é fundamental que o Estado identifique e compreenda as necessidades da população por meio de diagnósticos precisos e consultas, possibilitando a formulação de políticas coerentes e adaptáveis às mudanças e novas informações (Souza; Figueiredo; Benini, 2023).

A Lei nº 12.305/2012 estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), definindo seus princípios, metas e mecanismos de implementação. Ela orienta a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os resíduos perigosos. Além disso, a lei delimita claramente as responsabilidades dos geradores de resíduos e do poder público, bem como os instrumentos econômicos que devem ser aplicados para assegurar a eficácia na gestão desses resíduos (BRASIL, 2010).

A ABNT NBR 16156:2013, intitulada “Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – Requisitos para Atividade de Manufatura Reversa”, define diretrizes para minimizar os impactos ambientais durante e após o processo de reaproveitamento de resíduos eletroeletrônicos (Prado, 2018).

A logística reversa é um processo fundamental para o recolhimento, separação e destinação adequada de materiais que atingiram o fim de sua vida útil, permitindo sua reintegração à cadeia produtiva. Esse processo abrange etapas, como coleta, seleção, classificação e reciclagem, viabilizando o reaproveitamento de uma ampla gama de itens em diversas aplicações (Silva; Oliveira, 2022).

Diante do cenário atual do setor fotovoltaico no Brasil, foi instituído o Decreto nº 10.240/2020, que define diretrizes para a implementação obrigatória de logística reversa para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e suas partes. Os módulos

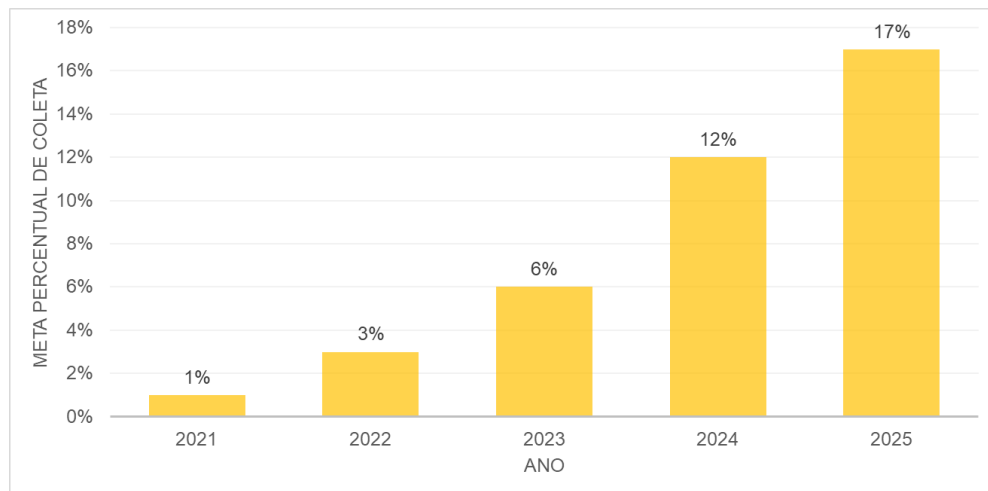
fotovoltaicos estão incluídos na lista de itens sujeitos à logística reversa. Dessa forma, fabricantes, fornecedores e comerciantes são obrigados a disponibilizar pontos de coleta para que os consumidores possam devolver os módulos usados, garantindo que sejam reciclados adequadamente e assumindo toda a responsabilidade pela logística reversa. Em caso de não conformidade, os responsáveis estarão sujeitos a penalidades conforme previsto em lei. (BRASIL, 2020).

A implementação e estruturação do Decreto nº 10.240/2020 ocorrerão em duas fases. A Fase I teve início na data de publicação do decreto, em 12 de agosto de 2020, com previsão de término em 31 de dezembro de 2020. Essa etapa inicial, com foco na gestão das partes envolvidas, tem como objetivo formar um grupo de acompanhamento de desempenho, composto por entidades participantes do sistema, incluindo fabricantes nacionais e comerciantes, cuja função é monitorar e divulgar o progresso da implementação. Além da formação do grupo, os participantes precisam demonstrar adesão às entidades gestoras do sistema, como o Ministério do Meio Ambiente e órgãos governamentais, como o Ibama (BRASIL, 2020).

O decreto também estabelece um mecanismo financeiro para sustentar a operação da logística reversa, financiado pelas empresas por meio de pagamentos diretos às entidades gestoras. Esse arranjo garante que todas as etapas do sistema sejam devidamente contempladas e que os recursos sejam alocados de forma diferenciada para cada tipo de produto eletroeletrônico, conforme critérios técnicos e econômicos estabelecidos. Além disso, o grupo de acompanhamento de desempenho será responsável por estruturar o mecanismo de supervisão e monitoramento da implementação do sistema pelos órgãos competentes (BRASIL, 2020).

Com o objetivo de capacitar os prestadores de serviços aderentes ao decreto, a Fase II consiste na promoção do sistema de logística reversa para engajar gestores municipais e, finalmente, na criação de pontos de coleta. Durante essa fase, foram definidas metas anuais para a quantidade de materiais a serem coletados, conforme detalhado na Figura 4 (BRASIL, 2020).

Figura 4 - Cronograma para atendimento de meta percentual a ser coletada e destinada anualmente



Fonte: Adaptado de BRASIL (2020)

É fundamental observar que o Decreto nº 10.240/2020 se aplica exclusivamente aos módulos residenciais voltados para a geração distribuída, e não há, até o momento, uma legislação específica para os módulos de usinas de grande porte, que pertencem à geração centralizada. Essa lacuna legislativa se torna preocupante, considerando que a geração centralizada foi pioneira na energia solar fotovoltaica, portanto, é na geração centralizada que os primeiros módulos fotovoltaicos do fim de sua vida útil, resultando em um volume considerável de sistemas fotovoltaicos obsoletos, sem uma regulamentação específica para sua gestão e destinação adequada (Santos; Varella, 2024).

Em 2022, foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) pelo Decreto nº 11.043/2022. Este plano é uma extensão crucial da PNRS, oferecendo um roteiro detalhado para alcançar seus objetivos. O Planares estabelece diretrizes, estratégias, ações e metas específicas para aprimorar a gestão de resíduos sólidos no país. Classificados como resíduos eletrônicos, os resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos também estão incluídos na PNRS, pois os componentes desses módulos são considerados resíduos sólidos (BRASIL, 2022).

O Planares traça diretrizes e estratégias essenciais para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, focando em uma gestão eficaz desses resíduos. O plano prioriza a sustentabilidade e a eficiência por meio do estabelecimento de sistemas de

logística reversa e responsabilidade compartilhada, envolvendo fabricantes, importadores e distribuidores na coleta e reciclagem dos módulos. Além disso, incentiva o desenvolvimento de tecnologias e processos que promovam a reciclagem eficiente e a recuperação de materiais valiosos dos módulos (BRASIL, 2022).

A responsabilidade compartilhada é definida como uma distribuição de funções entre as diferentes partes envolvidas durante as etapas do processo de logística reversa. O consumidor, tem a responsabilidade de descartar os resíduos de acordo com as orientações e os locais estabelecidos pelos sistemas de logística reversa. O setor privado, por sua vez, assume a responsabilidade pelo gerenciamento no âmbito ambiental adequado dos resíduos, utilizando os materiais como forma de prevenção a poluição ambiental, e reintegrando-os à cadeia produtiva e adotando práticas que promovam benefícios socioambientais. O Poder Público, por fim, fiscaliza o processo e promove a conscientização e a educação dos cidadãos sobre o manejo correto dos resíduos, em colaboração com os demais envolvidos (Santos; Varella, 2024).

Além dos pontos citados, o Planares estabelece metas específicas para as taxas de reciclagem e a quantidade de materiais recuperados, embora não sejam detalhadas diretamente no documento. O plano também promove programas de coleta para garantir que os módulos sejam devidamente encaminhados para reciclagem. Campanhas de educação e conscientização são previstas para informar o público e os stakeholders sobre a importância da reciclagem desses produtos e como participar dos programas de logística reversa. Para garantir a eficácia das estratégias, o plano inclui mecanismos de monitoramento e avaliação, com fiscalização contínua e relatórios regulares para assegurar o cumprimento das metas e ajustar as abordagens quando necessário (BRASIL, 2022).

Em resumo, a PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece o marco geral e os princípios para a gestão de resíduos sólidos no Brasil, promovendo a sustentabilidade e a redução de resíduos. O Decreto nº 10.240/2020 regulamenta a logística reversa, detalhando as responsabilidades de fabricantes e distribuidores para a coleta e o tratamento de resíduos de produtos e embalagens. Já o Decreto nº 11.043/2022, que institui o Planares, define diretrizes específicas e metas para a gestão de resíduos sólidos, incluindo a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Enquanto

a PNRS fornece os princípios gerais, o Decreto nº 10.240/2020 regula a logística reversa, e o Decreto nº 11.043/2022 detalha a implementação prática das diretrizes, com ênfase em estratégias e metas concretas para a reciclagem desses produtos.

A Comissão de Minas e Energia aprovou na data de 03 de julho de 2024, o Projeto de Lei nº 998/24, que estabelece um conjunto de regras para fomentar o reaproveitamento, a reciclagem e o descarte ambientalmente adequados de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil. O objetivo principal é expandir a reciclagem desses painéis, reduzir seus impactos ambientais e promover tecnologias de reciclagem mais eficazes e seguras. Ademais o Projeto define claramente as responsabilidades de todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos, incluindo fabricantes, importadores, distribuidores e consumidores (Agência Câmara de Notícias, 2024).

Proposto pelo deputado Benes Leocádio (União-RN), o projeto institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos. Esta política prevê a criação de fundos, linhas de crédito, sistemas de certificação e incentivos tributários para apoiar a pesquisa, a inovação tecnológica e a implementação de processos eficientes. Segundo o autor do projeto, “A destinação final dos painéis fotovoltaicos pode se tornar uma grande preocupação devido ao volume crescente de resíduos que será gerado nos próximos anos, especialmente pela falta de uma cadeia eficiente de reaproveitamento e reciclagem no Brasil”. O deputado destaca ainda que o problema é agravado pela presença de substâncias perigosas, como o seleneto de hidrogênio, nos componentes desses painéis (Agência Câmara de Notícias, 2024).

O relator do projeto, deputado Lafayette de Andrada (Republicanos-MG), ressaltou a importância de antecipar e mitigar os problemas decorrentes do aumento da geração de energia solar no Brasil, que tem crescido significativamente devido à redução dos custos de instalação e ao aumento dos preços da energia elétrica. Andrada defendeu que é fundamental que o Poder Público adote políticas públicas que incentivem a organização eficiente das cadeias de coleta, armazenamento, reciclagem e descarte de painéis fotovoltaicos, visando minimizar os impactos econômicos, sociais e ambientais desses processos (Agência Câmara de Notícias, 2024).

O projeto ainda precisa passar por análise em outras comissões e ser aprovado pelo Senado para se tornar lei, a situação do projeto encontra-se como “Aguardando Designação de Relator(a) na Comissão de Desenvolvimento Urbano (CDU)”¹ (Agência Câmara de Notícias, 2024).

No Quadro 3, encontra-se um resumo das políticas e regulamentações nacionais relacionadas ao descarte de resíduos, com foco especial nos resíduos fotovoltaicos.

Quadro 3 - Resumo de regulamentos nacionais para descarte de módulos FV
(continua)

Lei/Decreto	Regulamentações Específicas para Resíduos de Módulos Fotovoltaicos e/ou Outras Políticas e Programas Similares
Lei nº 12.305 de 2010	Institui a PNRS, estabelecendo diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Ela define responsabilidades para os diferentes setores da sociedade, incluindo a criação de planos de gestão de resíduos e a implementação de sistemas de coleta, tratamento e disposição final.
Decreto nº 10.240 de 2020	Publicado em 12 de fevereiro de 2020, estabelece diretrizes para a PNRS e cria o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). Ele define as responsabilidades dos diferentes níveis de governo e do setor privado na gestão de resíduos, incluindo a necessidade de elaboração de planos de gestão de resíduos pelos estados e municípios. Embora aborde a logística reversa, seu foco principal é a estruturação geral da gestão de resíduos sólidos.
Decreto nº 11.043 de 2022	O Decreto nº 11.043/2022 avança significativamente na gestão de resíduos sólidos, com um foco específico em logística reversa e economia circular. Estabelece diretrizes mais detalhadas para a redução, reciclagem e reaproveitamento de resíduos, incluindo painéis fotovoltaicos. Este decreto cria um sistema nacional de logística reversa abrangente e promove a integração com políticas ambientais e de desenvolvimento sustentável. Destaca a importância da inovação tecnológica e da educação ambiental, além de endereçar de forma mais específica os desafios associados aos resíduos de painéis fotovoltaicos, como a necessidade de tratamento e reciclagem de materiais perigosos.

¹ Situação do projeto na data consultada de 16 de setembro de 2024 e pode ser modificada a qualquer momento posterior a essa data.

Quadro 3 - Resumo de regulamentos nacionais para descarte de módulos FV
(conclusão)

<p>Projeto de Lei nº 998/2024</p>	<p>O Projeto de Lei (PL) nº 998/2024 está em fase de aprovação e propõe a criação de uma Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, incluindo a implementação de fundos, linhas de crédito e incentivos tributários para a pesquisa, inovação e processos de reciclagem desses painéis. O projeto visa expandir a reciclagem, reduzir impactos ambientais e promover tecnologias de reciclagem mais eficientes, com uma abordagem específica para os resíduos de painéis fotovoltaicos e a responsabilidade compartilhada ao longo de seu ciclo de vida.</p>
--	---

Fonte: Elaborado pela autora

Com base nos regulamentos apresentados no Quadro 3, os fabricantes são obrigados a garantir o destino adequado para os produtos eletroeletrônicos, incluindo os resíduos fotovoltaicos. No entanto, verifica-se uma adesão reduzida por parte dos fabricantes à aplicação de práticas de reciclagem adequadas, principalmente em razão dos elevados custos associados ao processo de reciclagem. (Souza; Figueiredo; Benini, 2023).

Vale ressaltar que embora o Brasil disponha dessas normativas, sua efetiva implementação não está garantida. Isso ocorre devido à ausência de mecanismos de fiscalização e de cobrança por parte dos órgãos públicos, bem como pela falta de conhecimento e acesso à informação por parte da população sobre as alternativas de descarte de resíduos (Kozen; Pereira, 2020).

5.3 DISCUSSÃO DO CENÁRIO INTERNACIONAL

A pesquisa bibliográfica permitiu identificar os tipos de abordagens para a gestão do fim da vida útil (Quadro 1), bem como os regulamentos internacionais voltados ao descarte de módulos fotovoltaicos (Quadro 2). A análise dessas abordagens e regulamentos internacionais evidencia semelhanças e diferenças significativas, que serão discutidas a seguir.

Entre as semelhanças, nota-se que muitos países compartilham a intenção de integrar práticas de reciclagem e reutilização como pilares da sustentabilidade ambiental. Exemplos incluem iniciativas com abordagens voluntárias, público-

privadas e regulatórias descritas no Quadro 1, cada uma com características específicas que refletem diferentes níveis de comprometimento e eficácia na promoção de uma economia circular.

No modelo voluntário, os próprios produtores assumem a responsabilidade pelo descarte, seja por meio de sistemas internos ou parcerias com terceiros. Exemplos notáveis incluem o *National PV Recycling Program*, nos Estados Unidos, e a *Solar Sustainability Initiative*, aplicados em países com estruturas regulatórias menos robustas para incentivar a coleta e a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Índia e Vietnã, apesar de não possuírem políticas específicas para resíduos fotovoltaicos, seguem diretrizes gerais para resíduos eletrônicos, que podem ser alinhadas a iniciativas voluntárias promovidas por fabricantes ou associações industriais.

O modelo regulatório, por sua vez, estabelece obrigações legais para a coleta e reciclagem, em contraste com a abordagem voluntária. Exemplos incluem a Diretiva WEEE da União Europeia e, especificamente na Alemanha, a Lei *ElektroG*, que determina metas específicas de recuperação (85%) e reciclagem (80%), promovendo uma abordagem padronizada e obrigatória. Esse modelo assegura a gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil.

Já o modelo público-privado oferece a possibilidade de compartilhamento da responsabilidade pelo descarte entre governos e indústrias, viabilizando maior alcance geográfico e eficiência na gestão de resíduos. Exemplos dessa abordagem incluem o *PVCycle* e o *RETRIEVE Project*. A Austrália, por sua vez, está desenvolvendo o *Solar PV Recycling Scheme* com base nesse modelo, enquanto já aplica restrições regionais, como a proibição do descarte de resíduos eletrônicos em aterros no estado de Victoria.

Entre as diferenças, os Estados Unidos dependem significativamente de abordagens voluntárias, em contraste com a rigidez das regulamentações europeias. Essa discrepância reflete a ausência de uma política federal abrangente para resíduos fotovoltaicos nos EUA, onde estados como Califórnia e Washington têm autonomia para implementar suas próprias legislações. Já a Coreia do Sul e a China se destacam pela adoção de estratégias regulatórias combinadas com investimentos em pesquisa e inovação tecnológica. Essas iniciativas incluem o desenvolvimento de sistemas de

Responsabilidade Estendida do Produtor e normas técnicas para reciclagem de módulos, como as estabelecidas pela *China Photovoltaic Industry Association*.

Por último, a análise das abordagens revela que, enquanto países como Japão, Índia e Vietnã ainda se baseiam em estruturas gerais para resíduos, nações como Alemanha, China e Coreia do Sul têm avançado significativamente em regulação e padronização. Em contraste, Austrália e Estados Unidos destacam a importância de parcerias e ações voluntárias, que complementam ou substituem a ausência de regulamentações específicas. Contudo, apesar dos avanços observados em muitos países, desafios significativos persistem em outros. Nesse contexto, o intercâmbio de informações entre as nações pode facilitar a identificação de instrumentos jurídicos mais eficazes para aprimorar a legislação nacional. Esse progresso tem o potencial de resultar em uma gestão de resíduos fotovoltaicos mais eficiente e sustentável no futuro.

5.4 DISCUSSÃO E PROPOSTAS PARA O CENÁRIO NACIONAL

Diante do cenário brasileiro atual, existem desafios significativos relacionados ao descarte de sistemas fotovoltaicos. Conforme a análise apresentada no Quadro 3 - Resumo de regulamentações nacionais para descarte de módulos FV, o decreto nº 10.240/2020 e o nº 11.043/2022 não mencionam incentivos ou subsídios para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos. Segundo Souza, Figueiredo e Benini (2023), essa ausência limita as ações nesse campo, devido aos altos custos envolvidos. De acordo com os referidos autores, sem o apoio governamental direcionado aos consumidores — sejam empresas ou residências —, o descarte correto dos resíduos torna-se um desafio, agravado pela falta de capacidade institucional no país e pela fragilidade no gerenciamento municipal.

Nesse contexto, é importante mencionar que os problemas relacionados ao gerenciamento inadequado de resíduos fotovoltaicos não são exclusivos do Brasil. De modo a enfrentar esse desafio, as análises propõem soluções fundamentadas em experiências internacionais bem-sucedidas, adaptando-as às particularidades do cenário nacional. Essas propostas visam mitigar os impactos ambientais e

econômicos associados ao descarte desses resíduos, promovendo a sustentabilidade e a inovação.

No âmbito internacional, diversas iniciativas podem servir como referência para superar esses desafios, como as abordagens regulatórias adotadas em países da União Europeia. As diretrizes da Diretiva WEEE, por exemplo, poderiam ser adaptadas ao cenário brasileiro. Reconhecida como uma legislação consolidada, essa diretiva incorpora o sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor, que exige que os fabricantes assumam a responsabilidade pela coleta e reciclagem de seus produtos ao final de sua vida útil. No Brasil, a implementação de um sistema semelhante poderia viabilizar a coleta de resíduos fotovoltaicos, permitindo que os consumidores agendassem a retirada desses materiais por meio de centros especializados. Essa prática já está em operação em países como a Alemanha, onde a Lei *ElektroG* estabelece metas específicas de recuperação (85%) e reciclagem (80%).

No Brasil, conforme apontam Santos e Varella (2024), embora o país possua legislações que abrangem sistemas fotovoltaicos, a aprovação de normas específicas, como o Projeto de Lei nº 998/2024, poderia preencher as lacunas existentes, incluindo os descartes provenientes da geração centralizada. Além disso, a implementação dessa legislação contribuiria para a redução do uso de aterros, considerando os riscos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos fotovoltaicos, especialmente devido à presença de materiais tóxicos, como discutido por Scolla (2020).

Problemas como a falta de fiscalização e a carência de informação sobre a gestão de resíduos fotovoltaicos, destacados por Kozen; Pereira (2020), podem ser mitigados por meio de campanhas de conscientização. Canais de grande alcance, como mídias sociais, televisão e outras plataformas de comunicação, são essenciais para sensibilizar a população sobre a importância do descarte correto desses resíduos, especialmente com a entrada em vigor de novas legislações.

As abordagens público-privadas também se mostram promissoras no contexto brasileiro. Exemplos como o *PVCycle* e o *RETRIEVE Project*, implementados na União Europeia, demonstram a eficácia da colaboração entre o setor privado e as autoridades públicas na promoção da coleta e reciclagem de módulos fotovoltaicos. A

Austrália, por sua vez, está desenvolvendo o *Solar PV Recycling Scheme* com base nesse modelo, visando ampliar a cobertura geográfica da coleta e melhorar a eficiência dos processos de reciclagem. No Brasil seria possível a adoção de uma estratégia similar, envolvendo fabricantes, autoridades locais e organizações ambientais em parcerias para criar centros de coleta e fomentar a logística reversa.

Além disso, a abordagem voluntária, exemplificada pelo *National PV Recycling Program* nos Estados Unidos, pode ser considerada uma alternativa viável no Brasil. Esse tipo de iniciativa depende de ações voluntárias dos produtores, que assumem a responsabilidade pelo fim da vida útil dos módulos. Programas globais, como a SSI, também promovem práticas sustentáveis na indústria solar, com foco na reciclagem e reutilização de módulos. No cenário nacional, a promoção de programas voluntários de devolução, como os exemplos mencionados, poderia complementar as diretrizes de resíduos eletrônicos já existentes e futuras legislações, incentivando fabricantes e consumidores a participarem de iniciativas de devolução e reciclagem.

Os incentivos econômicos são importantes para viabilizar a reciclagem em larga escala. A China, por exemplo, não apenas desenvolveu regulamentos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, mas também investiu em tecnologias de baixo custo e baixo consumo energético, estabelecendo normas para tornar os processos de reciclagem mais eficientes. No Brasil, a redução de impostos, como o ICMS, para fabricantes e recicladores poderia fomentar a criação de uma economia circular no setor de energia solar, ajudando o país a superar barreiras econômicas. Alinhar essas estratégias a um planejamento nacional integrado, com articulação entre diferentes níveis de governo, é essencial para garantir a eficácia das políticas implementadas. Boas práticas, combinadas à criação de uma legislação nacional específica e ao intercâmbio de conhecimentos com países que já possuem experiências bem-sucedidas, podem posicionar o Brasil de forma eficaz na gestão sustentável de resíduos fotovoltaicos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e o combate ao aquecimento global.

6 CONCLUSÃO

Conforme indicado inicialmente, o objetivo deste trabalho foi identificar e analisar políticas internacionais e nacionais relacionadas ao descarte de módulos fotovoltaicos. Para isso, foram examinadas legislações e diretrizes existentes, comparando semelhanças e diferenças entre os modelos internacionais adotados em diferentes contextos e abordagens. Além disso, regulamentações internacionais e nacionais em vigor foram discutidas de forma a embasar propostas para o cenário brasileiro.

Com o crescimento projetado para o mercado de energia solar fotovoltaica e a estimativa de um aumento expressivo na quantidade de módulos que atingirão o EOL nas próximas décadas, torna-se essencial adotar medidas fundamentadas nessas análises. Embora o Brasil tenha avançado na regulamentação do uso de energia fotovoltaica, ainda persistem lacunas significativas nas políticas públicas voltadas para o descarte adequado desses módulos. A implementação de modelos internacionais, como o Sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor, presente na Diretiva WEEE — amplamente reconhecida como uma das políticas mais eficazes para o descarte de módulos fotovoltaicos —, e iniciativas voluntárias, como o *National PV Recycling Program*, oferecem um referencial valioso para a formulação de estratégias eficazes no Brasil.

A adoção de incentivos econômicos, como a redução de impostos para fabricantes e recicladores, aliada à articulação de políticas públicas integradas, é fundamental para superar barreiras econômicas e fomentar uma economia circular no setor solar. Adicionalmente, a conscientização da população e o fortalecimento da infraestrutura de coleta e reciclagem são imprescindíveis para garantir a eficácia das políticas. Essas ações permitem que o Brasil acompanhe as boas práticas de países que já avançaram na gestão sustentável de resíduos fotovoltaicos. Alinhar essas estratégias a um planejamento nacional bem estruturado, com colaboração entre diferentes níveis de governo e o setor privado, é o caminho para uma gestão mais eficiente e sustentável desses resíduos. Tal alinhamento pode reduzir os impactos ambientais e a dependência de aterros sanitários, além de promover o uso sustentável de recursos energéticos e contribuir para o combate ao aquecimento global.

Diante das análises apresentadas, este trabalho busca contribuir para as discussões referentes à formulação e aprimoramento de políticas públicas voltadas ao descarte responsável de módulos fotovoltaicos no Brasil. Para pesquisas futuras, recomenda-se explorar as tecnologias disponíveis para a reciclagem de módulos fotovoltaicos e avaliar como elas podem ser adaptadas e implementadas no país, contribuindo para consolidar um sistema nacional de gestão de resíduos fotovoltaicos sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. **Comissão aprova projeto que incentiva reciclagem de painéis fotovoltaicos.** 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1080594-comissao-aprova-projeto-que-incentiva-reciclagem-de-paineis-fotovoltaicos>. Acesso em: 16 set. 2024.

AQLAN, A.; VAN DER WINDT, H. **Solar Power Technologies Growth in the United States, an Integrated Four Pillars Perspective.** *American Journal of Modern Energy*, 20 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia solar representa 19,5% da matriz elétrica brasileira.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/energia-solar-representa-195-da-matriz-eletrica-brasileira/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Geração distribuída fotovoltaica cresce 230% ao ano no Brasil.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-fotovoltaica-cresce-230-ao-ano-no-brasil/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Participação da solar na matriz elétrica sobe de 11,6% para 17% em um ano.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-canalsolar-com-br-participacao-da-solar-na-matriz-eletrica-sobe-de-116-para-17-em-um-ano/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BEIGELMAN, Bruno Boaventura. **A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013. xiii, 61 p.: Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007228.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2024.

BOMGARDNER, M.M.; SCOTT, A. **Recycling Renewables.** Disponível em: <https://cen.acs.org/energy/renewables/Recyclingrenewables/96/i15>. Acesso em: 9 jun. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** Regulamenta a logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 ed., 12 fev. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 7 set. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível

em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 8 set. 2024.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares)**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 8 set. 2024.

CANAL SOLAR. **Painéis solares: mitos e verdades sobre o descarte dos equipamentos**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/paineis-solares-mitos-e-verdades-sobre-o-descarte-dos-equipamentos/>. Acesso em: 21 nov. 2024

DOS ANJOS, Morjana Freire. **O papel das energias renováveis no processo de transição energética do estado de minas gerais: modelagem de sistemas energéticos para o horizonte 2030-2050**. Dissertação Pós Graduação Engenharia Nuclear e da Energia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ENERGÊS. **Degradação**. 2023. Disponível em: [https://energes.com.br/degradacao/#:~:text=O%20LID%20\(Light%20Induced%20Degradation,nas%20c%C3%A9lulas%20do%20tipo%20P](https://energes.com.br/degradacao/#:~:text=O%20LID%20(Light%20Induced%20Degradation,nas%20c%C3%A9lulas%20do%20tipo%20P). Acesso em: 21 nov. 2024.
EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Clima e Energia**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>. Acesso em: 21 nov. 2024.

FISCHER, Anne. **Solar recycler approved for National PV Recycling Program**. pv magazine USA, 5 set. 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine-usa.com/2024/09/05/solar-recycler-approved-for-national-pv-recycling-program/>. Acesso em: 20 nov. 2024

ISE - FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. **Photovoltaics Report**, 2023. p.57. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries 2022 PVPS Task 12 PV Sustainability**. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/09/Report-IEA-PVPS-T12-24_2022_Status-of-PV-Module-Recycling.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Status of PV Module Take-Back and Recycling in Germany 2024 PVPS Task 12 PV Sustainability Activities**. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/03/IEA-PVPS-T12-27-Report-PV-Recycling-in-Germany.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2024.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **End-of-life management: Solar photovoltaic panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016. p.100. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. Acesso em: 1 ago. 2024.

JAYAPRADHA, P.; BARIK, D. A. **Review of Solar Photovoltaic Power Utilizations in India and Impacts of Segregation and Safe Disposal of Toxic Components from Retired Solar Panels.** *International Journal of Energy Research*, 2023.

Disponível em: <https://typeset.io/papers/a-review-of-solar-photovoltaic-power-utilizations-in-india-co7tbd7b>. Acesso em: 15 jun. 2024.

KAHANA, Lior. **Trina Solar presents ‘fully recyclable’ 645 W PV module with 20.7% efficiency.** *Pv Magazine*, 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2024/09/24/trina-solar-presents-fully-recyclable-645-w-pv-module-with-20-7-efficiency/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

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. P. 1-10. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1011>. Acesso em: 11 set. 2024.

LATUNUSSA, C.; MANCINI, L.; BLENGINI, G.; ARDENTE, F.; PENNINGTON, D. **Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels.** *JRC Technical Report*, European Commission, mar. 2016. doi:10.2788/786252.

PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais.** 2020. p.10. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30012019-141410/publico/PedroForastierideAlmeidaPradoCorr18.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2024.

SCOLLA, Minéia. **Avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia fotovoltaica: uma análise sob a ótica de fatores ambientais.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020.

SHARMA, Arvind; PANDEYB, Suneel; KOLHE, Mohan. **Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. 2019.** Disponível em: <https://www.ijsgce.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=83&id=496>. Acesso em: 25 jul. 2024.

SILVA, H. M. F. da; ARAÚJO, F. J. C. **Energia solar fotovoltaica no brasil: uma revisão bibliográfica.** *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <https://www.periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SILVA, Cristiano Cruz da; OLIVEIRA, Wemerson Franklyn Araujo de. **Gestão dos resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos.** 2022. p.92. TCC (Graduação) - Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética, Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2022.

SILVA, Emylle Cristine Alves; VARELLA, Fabiana Karla de Oliveira Martins. **Logística reversa no setor fotovoltaico**. Universidade Federal Rural do Semi-árido. 2024. p.10. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/9af4e9d7-1817-4598-9f6b-1d18e4aee7bc>. Acesso em: 5 set. 2024.

SILVEIRA, Nicolli, S.; JUNIOR, Jair U. **Cadeia de valor na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. In Congresso Brasileiro de Energia Solar, 9.,2022, Florianópolis, Anais [...]. Curitiba: Universidade Federal Tecnológica do Paraná, 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/download/1058/1059/1060>. Acesso em: 01 jul. 2023.

SOLAR POWER AUTHORITY. **A history of solar cells**. (2020). Disponível em: <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/>. Acesso em: 04 dez. 2024.

SOLAR POWER POWER PORTAL. **Solar supply chain sustainability initiative opens for consultation**. (2023). Disponível em: https://www.solarpowerportal.co.uk/news/solar_supply_chain_sustainability_initiative_opens_for_public_consultation. Acesso em: 01 jul. 2023.

SOUSA, Nelson Monteiro de. **O desafio do descarte futuro dos resíduos de sistemas fotovoltaicos no Brasil**. 2021. p.98. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

SOUZA, Vanessa; FIGUEIREDO; Adriano Marcos Rodrigues; BENINI, Elcio Gustavo. (2023). **Reciclagem de resíduos fotovoltaicos: mecanismos de gerenciamento e políticas públicas no estado brasileiro**. Disponível em: 10.47402/ed.ep.c2023119219778. Acesso em: 14 set. 2024.

TAN, Jovan.; JIA, Shuyue.; RAMAKRISHNA, Seeram. **End-of-life photovoltaic modules**. *Energies*, v. 15, n. 5113, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15145113>. Acesso em: 9 jun. 2024.

XU, Yan; LI Jinhui; TAN, Quanyin; PETERS, Anesia Lauren; YANG, Congren. **Global status of recycling waste solar panels: a review**. *Waste Management*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>. https://www.researchgate.net/publication/342714127_Global_review_of_policies_guidelines_for_recycling_of_solar_PV_modules Acesso em: 20 nov. 2024.

YU, H.F.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N.A.; AMIN, N.; NOR ADZMAN, N. **Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review**. *Sustainability* 2022. p.41. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14148567>. Acesso em: 12 ago. 2024.