

Trabalho de Formatura
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**RESÍDUOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE DO CENÁRIO
LEGISLATIVO NO BRASIL E NO MUNDO**

GABRIELA USTULIN

Prof Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro - SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

GABRIELA USTULIN

RESÍDUOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UMA
ANÁLISE DO CENÁRIO LEGISLATIVO NO BRASIL E
NO MUNDO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro – SP
2024

U88r

Ustulin, Gabriela

Resíduos de módulos fotovoltaicos: : Uma análise do cenário legislativo no Brasil e no mundo / Gabriela Ustulin. -- Rio Claro, 2024

74 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. Engenharia Ambiental. 2. Resíduos. 3. Energia Fotovoltaica. 4. Logística Reversa. 5. Legislação Ambiental. I. Título.

GABRIELA USTULIN

RESÍDUOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE DO CENÁRIO LEGISLATIVO NO BRASIL E NO MUNDO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)

Vânia Silvia Rosolen

Maria Luisa Nerys De Moraes Carneiro

Rio Claro, 03 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **MARCUS CESAR AVEZUM ALVES DE CASTRO**
Data: 04/12/2024 09:47:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Márcia Ustulin e Luciano Ustulin, que sempre foram meu alicerce, meu porto seguro e minhas maiores inspirações. Sou profundamente grata por acreditarem no meu potencial e por me ensinarem, dia após dia, a ser forte e a lutar pelos meus sonhos.

Agradeço ao professor Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro pela dedicação e orientação valiosa, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sem seu apoio, este projeto não teria sido possível.

Também agradeço, de modo abrangente, à UNESP, aos professores que participaram da minha formação e aos demais colaboradores do Instituto.

Agradeço aos meus colegas de classe e a todos os amigos que fiz ao longo desses anos por tornarem os momentos difíceis mais leves e por contribuírem com lembranças que levarei para sempre.

Agradeço ao Caique, por estar ao meu lado em cada etapa desta jornada e por ser meu companheiro de vida, compartilhando alegrias, superando desafios e tornando cada dia mais especial com seu amor e apoio.

Por fim, agradeço à República Cabeças, que foi meu lar durante os anos de faculdade e se tornou minha família. Sou grata por me acolherem com tanto carinho, por tudo o que me ensinaram e por cada momento que compartilhamos juntas.

Desejo que todos aqui mencionados, assim como aqueles que, mesmo não citados, fizeram parte desta jornada, saibam o quanto contribuíram para minha formação. Espero, um dia, retribuir à altura todo o apoio e confiança que depositaram em mim.

RESUMO

O crescimento do setor fotovoltaico no Brasil destaca a demanda de uma regulamentação eficaz para o descarte de resíduos dos módulos solares. Este trabalho analisa a gestão atual dos resíduos de módulos fotovoltaicos no Brasil, na União Europeia, nos Estados Unidos e na China, com foco na viabilidade de regulamentações que incentivem a reciclagem e a logística reversa. A expansão da energia solar no país, impulsionada pelo clima favorável e por incentivos à geração distribuída, aumentou a demanda por diretrizes específicas para o setor. A pesquisa incluiu a análise da composição dos módulos, o cenário global da energia fotovoltaica e as regulamentações vigentes em países como da União Europeia, Estados Unidos e China. Além disso, dados foram coletados por meio de questionários enviados a empresas do setor fotovoltaico para identificar práticas de descarte e o nível de conhecimento sobre a legislação ambiental vigente no Brasil. Os resultados indicaram uma carência de conhecimento sobre logística reversa entre as empresas consultadas, além da ausência de políticas públicas específicas para o setor. Atualmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece diretrizes gerais, mas carece de especificações para resíduos fotovoltaicos, o que limita a eficácia das ações. Conclui-se que uma regulamentação e um acordo setorial, com metas de coleta e um sistema de rastreamento e logística reversa apoiados por um fundo próprio, incentivos fiscais e campanhas educativas, podem ajudar a reduzir o impacto ambiental dos módulos fotovoltaicos e melhorar o aproveitamento de materiais. Essas medidas não só promoveriam a economia circular no setor solar, mas também posicionariam o Brasil entre os países que adotam as melhores práticas globais para o gerenciamento sustentável desses resíduos.

Palavras-chave: Resíduos Fotovoltaicos, Logística Reversa, Energia Solar, Legislação Ambiental, Gestão de Resíduos, Módulos Solares.

ABSTRACT

The growth of the photovoltaic sector in Brazil highlights the demand for effective regulation regarding the disposal of solar module waste. This study analyzes the current management of photovoltaic module waste in Brazil, the European Union, the United States, and China, focusing on the feasibility of regulations that encourage recycling and reverse logistics. The expansion of solar energy in the country, driven by favorable weather conditions and incentives for distributed generation, has increased the demand for specific guidelines for the sector. The research included an analysis of module composition, the global photovoltaic energy scenario, and existing regulations in countries such as the European Union, the United States, and China. Additionally, data were collected through questionnaires sent to companies in the photovoltaic sector to identify disposal practices and the level of knowledge regarding current environmental legislation in Brazil. The results indicated a lack of knowledge about reverse logistics among the consulted companies, as well as the absence of specific public policies for the sector. Currently, the National Solid Waste Policy establishes general guidelines but lacks specifications for photovoltaic waste, limiting the effectiveness of actions. The study concludes that regulation and a sectoral agreement, with collection targets and a tracking system supported by a dedicated fund, tax incentives, and educational campaigns, could help reduce the environmental impact of photovoltaic modules and improve material recovery. These measures would not only promote a circular economy in the solar sector but also position Brazil among countries adopting global best practices for the sustainable management of this waste.

Keywords: Photovoltaic Waste, Reverse Logistics, Solar Energy, Environmental Legislation, Waste Management, Solar Modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Organograma da pesquisa ao referencial teórico.....	15
Figura 2 - Organograma da pesquisa de regulamentação.....	17
Figura 3- Projeção de instalação de energia solar fotovoltaica até 2030 e 2050	20
Figura 4- Ranking dos 10 Países com Maior Capacidade de Geração de Energia Fotovoltaica em 2022	22
Figura 5- Capacidade de Energia Renovável Instalada no Mundo em 2023	23
Figura 6 - Gráfico da Matriz Elétrica Brasileira em setembro de 2024.....	24
Figura 7- Estrutura de um módulo fotovoltaico.....	27
Figura 8 - Diagrama para as principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente.....	28
Figura 9- Comparação entre células de p-Si e m-Si e sua disposição em módulos fotovoltaicos.....	29
Figura 10 - Célula de GaAs de filme fino	31
Figura 11 - Distribuição média dos diferentes tipos de materiais presentes nos REEE.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo das Regulamentações dos Estados dos Estados Unidos.....	41
Tabela 2 - Respostas da Pergunta 1 do Questionário	49
Tabela 3- Respostas da Pergunta 2 do Questionário.....	50
Tabela 4- Respostas da Pergunta 3 do Questionário.....	50
Tabela 5- Respostas da Pergunta 4 do Questionário.....	51
Tabela 6- Respostas da Pergunta 5 do Questionário.....	51
Tabela 7- Respostas da Pergunta 6 do Questionário.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

a-Si - Silício Amorfo

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

As - Arsênio

CdTe - Telureto de Cádmio

CBD - Deposição por Banho Químico

CIGS - Cobre-Índio-Gálio

CIS - Disseleneto de cobre-índio

CSP - Células de Perovskita

CSS - Sublimação em Espaço Reduzido

CSSC - Células Solares Sensibilizadas por Corantes

DTSC - Departamento de Controle de Substâncias Tóxicas

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

ESSB - Engrossed Substitute Senate Bill - Projeto de Lei Substitutivo do Senado Revisado

EUA - Estados Unidos da América

EVA - Ethylene Vinyl Acetate

FiT - Feed-in Tariff - Tarifa Renovável Avançada

Ga - Gálio

GaAs - Arsenieto de Gálio

GAP - Grupo de Acompanhamento de Performance

GW - Gigawatt

HB - House Bill - Projeto de Lei da Câmara

HJT - Células de Heterojunção

IEA - International Energy Agency - Agência Internacional de Energia

IRENA - Agência Internacional para as Energias Renováveis

LPCVD - Deposição Química a Vapor em Baixas Pressões

m-Si - Silício Monocristalino

MW - Megawatt

NBR - Norma Brasileira

OSC - Células Orgânicas

PL - Projeto de Lei

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPA - Power Purchase Agreement - Contrato de Compra de Energia

p-Si - Silício Multicristalino

RCRA - Lei de Conservação e Recuperação de Recursos

REEE - Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

REP - Responsabilidade Estendida do Produtor

SB - Senate Bill - Projeto de Lei do Senado

UE - União Europeia

UV - Radiação Ultravioleta

WEEE - Waste from Electrical and Electronic Equipment

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivos Específicos	14
3.	METODOLOGIA.....	15
3.1	Pesquisa do Referencial Teórico.....	15
3.2	Elaboração e Aplicação do Questionário de Pesquisa de Campo.....	17
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	Energia Fotovoltaica.....	19
4.1.1	Cenário da Energia Fotovoltaica no Mundo.....	19
4.1.2	Cenário da Energia Fotovoltaica no Brasil	23
4.2	Módulos Fotovoltaicos.....	25
4.2.1	Estrutura dos Módulos Fotovoltaicos.....	26
4.3	Tecnologias Fotovoltaicas	27
4.3.1	Células Fotovoltaicas de Primeira Geração.....	28
4.3.2	Células Fotovoltaicas de Segunda Geração	29
4.3.3	Células Fotovoltaicas de Terceira Geração.....	31
4.4	Caracterização dos Resíduos de Módulos Fotovoltaicos	33
4.5	Destinação de Resíduos Fotovoltaicos	34
5.	ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS PARA A REGULAMENTAÇÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	36
5.1	Cenário da Regulamentação Internacional.....	36
5.1.1	União Europeia.....	36
5.1.2	Estados Unidos	38
5.1.3	China.....	41
5.2	Cenário da Regulamentação Brasileira	45
6.	ANÁLISE DAS RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO.....	49
7.	SUBSÍDIOS PARA A PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	ANEXOS	70
	ANEXO A – Questionário Enviado Para As Empresas.....	71

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis tem impulsionado o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica globalmente. A busca por alternativas sustentáveis que reduzam a emissão de gases de efeito estufa e contribuam para a mitigação das mudanças climáticas tornou a energia solar uma solução atrativa tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento. Graças ao avanço tecnológico, à redução de custos dos equipamentos e ao aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos, a instalação de sistemas solares tornou-se mais acessível e economicamente viável para consumidores residenciais, comerciais e industriais. Em nível mundial, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica passou de 40 GW em 2010 para mais de 1.000 GW em 2023, tornando-se uma das fontes de energia de mais rápido crescimento no planeta (IEA, 2023).

No Brasil, o setor fotovoltaico também tem apresentado uma rápida expansão, impulsionado por uma combinação de fatores naturais e econômicos. O país, localizado em uma região tropical, possui altos índices de radiação solar durante o ano todo, o que o coloca em uma posição privilegiada para a geração de energia solar. Além disso, o cenário da última crise hídrica em 2021, somado ao aumento das tarifas de energia elétrica, com a adoção da bandeira de escassez hídrica, elevando o valor da tarifa de energia, vigente até abril de 2022, tem impulsionado empresas e consumidores a buscarem alternativas energéticas mais econômicas, sustentáveis e capazes de suprir a crescente demanda por eletricidade. O consumo de energia no setor residencial em maio de 2024, por exemplo, apresentou um aumento de 13,5% em relação a maio de 2023, enquanto o consumo industrial registrou um crescimento de 4,9%, e o setor comercial, 11,4% (ANEEL, 2024).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a capacidade instalada de energia solar no Brasil ultrapassou 40 GW no início de 2024, consolidando-se como a segunda maior fonte de geração de energia elétrica do país, atrás apenas da energia hidrelétrica.

Esse crescimento se reflete em dois tipos principais de geração: a geração centralizada, caracterizada por grandes usinas solares que fornecem energia

diretamente para a rede elétrica, e a geração distribuída, onde pequenos sistemas solares instalados em residências e empresas contribuem para o autoconsumo e o alívio da demanda no sistema elétrico nacional. A geração distribuída, em particular, tem se consolidado no Brasil, impulsionada tanto pelas políticas de incentivo quanto pelo modelo de compensação de energia (net metering), que possibilita aos consumidores compensarem o excedente de energia gerado em suas faturas de eletricidade. Esse mecanismo foi revisado e regulamentado pelo Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, estabelecido pela Lei nº 14.300, de 2022.

Além dos benefícios econômicos para os consumidores, o setor solar tem gerado impactos positivos na economia brasileira. Entre 2012 e 2024, o setor de energia solar fotovoltaica gerou mais de R\$ 189 bilhões em investimentos, proporcionou R\$ 53 bilhões em arrecadação aos cofres públicos e criou cerca de 1,2 milhão de empregos diretos e indiretos (ABSOLAR, 2024). Esses números reforçam o papel estratégico da energia solar para o desenvolvimento sustentável do Brasil, não apenas no aspecto ambiental, mas também no econômico e social.

A energia solar fotovoltaica, ao aproveitar diretamente a luz do sol para gerar eletricidade, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz elétrica brasileira. No entanto, como qualquer tecnologia, também apresenta desafios ambientais, especialmente no que se refere ao fim de vida útil dos módulos fotovoltaicos. Estima-se que a vida útil de um módulo fotovoltaico seja de 25 a 30 anos, e com o crescimento do setor, o volume de resíduos gerados por placas solares em desuso tende a aumentar significativamente nas próximas décadas.

Esse cenário levanta a questão crítica sobre o destino dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil. O descarte inadequado desses módulos, compostos por materiais como vidro, polímeros, metais raros (como prata e índio) e silício, pode resultar em contaminação ambiental significativa e desperdício de recursos valiosos. O reaproveitamento desses materiais surge, então, como uma solução que não só previne impactos ambientais, mas também oferece benefícios econômicos e contribui para a sustentabilidade do setor.

Enquanto o reaproveitamento e a reciclagem de equipamentos eletrônicos já são amplamente discutidos, o descarte de placas solares é uma questão emergente, porém pouco discutida em relação aos aspectos legais e normativos para disciplinar o ciclo destes materiais após a sua vida útil ou ainda quando danificados. Globalmente, algumas regiões já avançaram em políticas de descarte sustentável. A União Europeia, por exemplo, incluiu os módulos fotovoltaicos na Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE Directive), exigindo que fabricantes e importadores assumam a responsabilidade por sua coleta e reciclagem. Nos Estados Unidos e em algumas partes da Ásia, estão sendo desenvolvidas iniciativas para promover a destinação adequada dos módulos, embora esses esforços variem em grau de implementação.

No Brasil, a falta de regulamentação específica para o descarte de módulos fotovoltaicos é preocupante. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece diretrizes gerais para a gestão de resíduos, mas não aborda diretamente a questão das placas solares. Isso pode resultar no aumento do descarte inadequado, potencialmente prejudicando o meio ambiente e desperdiçando materiais que poderiam ser reincorporados à cadeia produtiva. Assim, além da reciclagem, é essencial desenvolver uma estratégia integrada que inclua o descarte seguro, a reutilização e o reaproveitamento de materiais, garantindo a sustentabilidade do setor a longo prazo.

Este trabalho investigará a composição dos módulos, os processos de reciclagem existentes e o estado atual da legislação, com foco na experiência de países como a União Europeia, Estados Unidos e China. A partir dessa análise, serão propostas diretrizes para o desenvolvimento de políticas públicas brasileiras que regulem tanto o descarte quanto a reciclagem dos módulos fotovoltaicos.

Essa abordagem integrada, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor, promove a economia circular, que busca maximizar a vida útil dos recursos utilizados. Assim, este estudo pretende fornecer subsídios para o desenvolvimento de uma regulamentação nacional, adaptada às particularidades do contexto brasileiro e alinhada às melhores práticas internacionais. Ao abordar o descarte e a reciclagem de forma abrangente, o trabalho busca contribuir para um

futuro mais sustentável e eficiente no uso de recursos na transição energética do Brasil.

2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi analisar o cenário dos resíduos de placas solares no Brasil e no mundo, destacando os desafios legais, e propor recomendações para a regulamentação do descarte no Brasil, com base em práticas internacionais.

2.1 Objetivos Específicos

- Analisar a legislação vigente no Brasil relacionada ao descarte de placas solares, avaliando a existência ou ausência de normas específicas.
- Compreender as práticas de descarte adotadas pelas empresas do mercado fotovoltaico brasileiro.
- Propor subsídios para a regulamentação da destinação dos resíduos de placas solares no Brasil, considerando o contexto global e as necessidades locais.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi organizada em três partes. A primeira parte foi contextualização das pesquisas bibliográficas, enfocando as principais referências acadêmicas e legislativas relacionadas à reciclagem de placas solares. Nesta seção, foram analisadas as regulamentações atuais no Brasil e em outros países, bem como diversos artigos que investigam a situação dos resíduos de módulos solares em escala global.

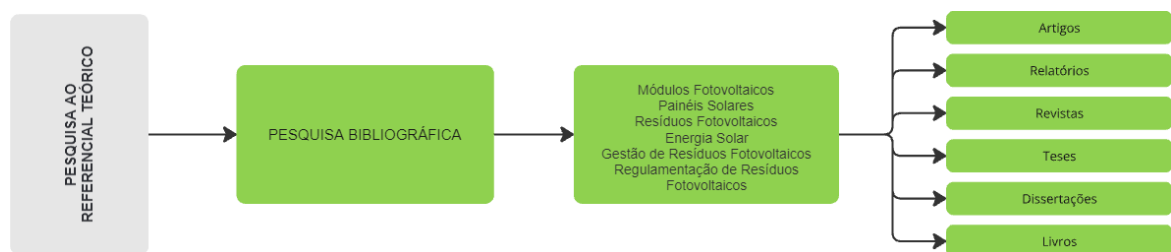
A segunda parte trata da construção e aplicação de um questionário destinado a representantes de empresas do setor fotovoltaico. Este questionário tem como objetivo compreender melhor a gestão dos resíduos de placas solares.

Por fim, a terceira parte se dedicou à análise e investigação dos dados levantados nas duas etapas anteriores. Foram utilizados métodos de análise qualitativa e quantitativa para interpretar os resultados, permitindo identificar tendências e contribuir para propostas de melhorias na gestão dos resíduos de placas solares no Brasil.

3.1 Pesquisa do Referencial Teórico

As pesquisas deste capítulo foram divididas em três etapas. Primeiramente, foi realizada uma extensa revisão da literatura, utilizando livros, revistas, artigos, teses e dissertações publicadas no Brasil e no exterior. Essa pesquisa forneceu dados técnicos relevantes para a análise da situação da gestão dos resíduos de módulos solares, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Organograma da pesquisa ao referencial teórico.



Fonte: Autora, 2024.

- **Motores de busca:**

- ASCE, EBSCO, Google Acadêmico, Science Direct e SciELO.

- **Palavras-chave:**

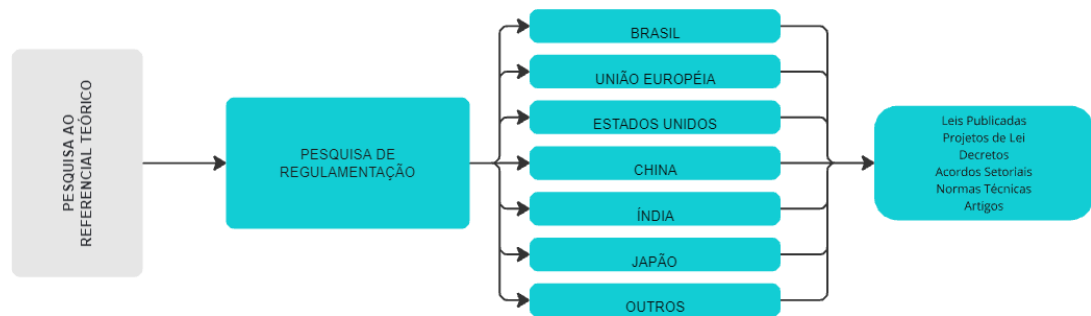
- “GESTÃO”, “RESÍDUOS”, “ENERGIA SOLAR”, “MÓDULOS FOTOVOLTAICOS”, “REGULAMENTAÇÃO”, “DESCARTE”, “RECICLAGEM”, “WASTE MANAGEMENT”, “SOLAR ENERGY”, “PHOTOVOLTAIC MODULES”, “REGULATION”, “DISPOSAL”, “RECYCLING”.

Foram utilizados termos de conexão ou restrição conforme a quantidade de resultados obtidos.

Após a importação dos resultados das pesquisas, foi utilizado o software de gestão bibliográfica Mendeley para extrair os seguintes dados do material coletado: (1) ano de publicação, (2) periódico, (3) título e (4) resumo. Com a base de dados organizada, iniciou-se a análise de relevância, considerando o alinhamento do periódico, do título e do resumo com o tema do estudo. O objetivo dessa primeira etapa foi classificar os artigos selecionados com base no ano de publicação e na relevância para o trabalho.

Na segunda etapa da pesquisa, foram levantadas as legislações e normativas dos países sobre o descarte de resíduos fotovoltaicos. Foram identificados documentos regulatórios relacionados às práticas de gestão em nível internacional, incluindo resoluções, normas, leis, decretos e documentos complementares, e artigos que analisam e comparam essas regulamentações, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Organograma da pesquisa de regulamentação.



Fonte: Autora, 2024.

Essa etapa foi fundamental para analisar o nível de desenvolvimento das legislações relacionadas ao descarte de resíduos fotovoltaicos, tanto no Brasil quanto em outros países, possibilitando, em seguida, a comparação desses normativos e a elaboração de propostas de ajustes para a legislação brasileira.

3.2 Elaboração e Aplicação do Questionário de Pesquisa de Campo

A metodologia adotada nesta pesquisa incluiu a elaboração de um questionário com o objetivo de coletar informações sobre a gestão da reciclagem de placas solares junto a diversas empresas do setor fotovoltaico e de reciclagem. A construção do questionário foi baseada em uma revisão da literatura pertinente e nas necessidades específicas identificadas durante as fases iniciais da pesquisa.

Na primeira etapa, o questionário foi estruturado com um total de seis perguntas, as quais abordaram temas, incluindo: (1) os procedimentos das empresas para a destinação das placas no final de sua vida útil; (2) o manejo de placas danificadas; (3) o nível de conhecimento das empresas acerca das legislações ambientais vigentes; e (4) os desafios enfrentados pelas empresas em relação aos resíduos gerados. As questões foram formuladas de maneira clara e objetiva, empregando uma combinação de perguntas abertas, o que possibilita uma análise tanto quantitativa quanto qualitativa dos dados coletados.

Na segunda etapa, foram encontradas 18 empresas de instalação e compra de placas solares por meio de pesquisa na internet, sendo 15 delas localizadas no estado de São Paulo.

Nos dias 2 e 3 de setembro de 2024, foi realizado um contato inicial com as empresas por e-mail, apresentando o objetivo do questionário. Em 9 de setembro, foi feito um novo contato via WhatsApp, no qual quatro empresas retornaram demonstrando interesse em participar.

As empresas que responderam ao questionário estão localizadas no interior de São Paulo. Duas delas estão em Rio Claro: a Empresa A, no mercado desde 2022, e a Empresa B, atuando desde 2019. A Empresa C, localizada em Leme, foi fundada em 1991, e a Empresa D, de Limeira, está no mercado desde 2019.

O objetivo dessa abordagem foi aprofundar a compreensão do panorama atual da destinação dos resíduos de placas solares no Brasil, permitindo a identificação de boas práticas, barreiras e oportunidades que possam aprimorar a gestão dos resíduos fotovoltaicos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Energia Fotovoltaica

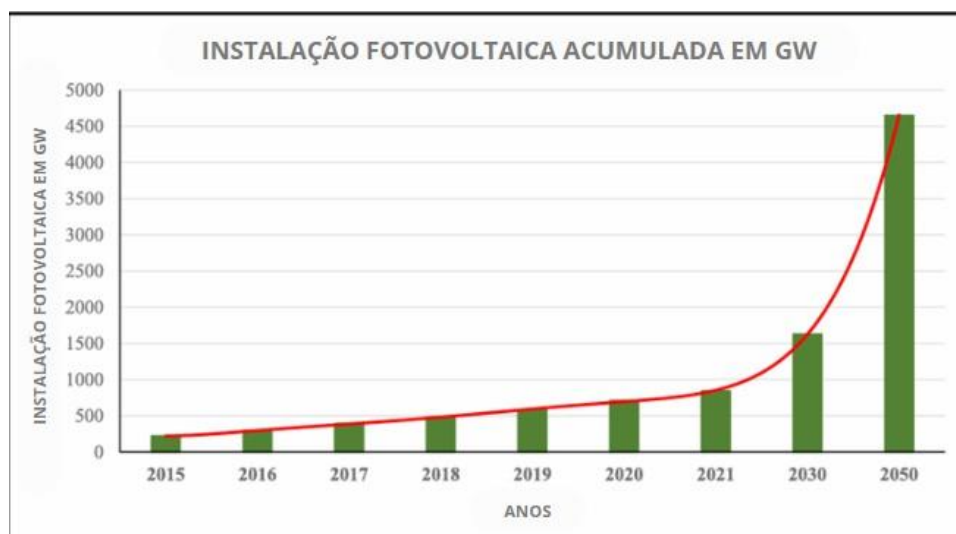
A energia fotovoltaica é de suma importância no contexto global atual, em que a busca por fontes renováveis de energia é essencial para enfrentar desafios ambientais e econômicos. A principal vantagem dessa tecnologia é a capacidade de gerar eletricidade sem emissões diretas de gases de efeito estufa, contribuindo para a redução do aquecimento global (Khan et al., 2022). Como fonte renovável, a energia solar é praticamente inesgotável, ao contrário dos combustíveis fósseis.

Além dos benefícios ambientais, a energia fotovoltaica é altamente escalável, podendo ser utilizada em grandes usinas ou em sistemas distribuídos, como painéis solares residenciais e comerciais. Esse modelo descentralizado favorece a democratização do acesso à energia, especialmente em regiões remotas ou com infraestrutura deficiente (SILVA et al., 2020).

4.1.1 Cenário da Energia Fotovoltaica no Mundo

A energia fotovoltaica tem registrado um crescimento notável no cenário global. De acordo com relatórios da IRENA (Agência Internacional de Energia Renovável, 2023), os painéis solares fotovoltaicos são atualmente a principal fonte de energia renovável, com potencial para suprir cerca de 60% da demanda elétrica global. As projeções indicam um aumento significativo na capacidade de geração de energia solar fotovoltaica, com expectativa de alcançar mais de 1630 GW até 2030 e 4500 GW até 2050, conforme mostrado na Figura 3 (PREET; SMITH, 2024).

Figura 3 – Projeção de instalação de energia solar fotovoltaica até 2030 e 2050.



Fonte: Adaptado de PREET; SMITH, 2024.

A China destaca-se como líder global, chegando a 510 GW de capacidade instalada em agosto de 2024 (Portal Solar, 2024), representando 71% dos dez maiores mercados solares do mundo e 57% de todo o planeta (SOLARPOWER EUROPE, 2024). Essa liderança é atribuída não apenas à sua vasta capacidade de produção de painéis solares, mas também a políticas de incentivo que promovem o uso de energia solar em áreas rurais e urbanas (CHINA, 2024).

Nos Estados Unidos, que segue em segundo lugar no ranking de geração de energia fotovoltaica, ilustrado na Figura 4 a seguir, também possui um mercado em crescimento, com iniciativas de redução de impostos com o *Inflation Reduction Act of 2022*, pacote legislativo de combate à inflação e mudanças climáticas (Portal Solar, 2024). Em 2023, os Estados Unidos instalaram 32,4 GW de capacidade de energia solar, estabelecendo um recorde histórico e um aumento de 51% em comparação com 2022. A energia solar representou 53% da nova capacidade de geração elétrica adicionada no país naquele ano (Portal Solar, 2024).

De acordo com o Relatório Anual de Previsões para o Mercado de Energia Solar da SolarPower Europe, principal associação do setor fotovoltaico europeu, o mercado solar na Europa continua a apresentar um desempenho sólido, com um

aumento expressivo nas capacidades instaladas anualmente. Após taxas de crescimento de 34% em 2021 e 45% em 2022, a região alcançou um crescimento de 51% em 2023, totalizando 70,1 GW e representando 16% do mercado global.

Segundo o relatório, a União Europeia experimentou um crescimento de 50% no último ano, com 26 dos 27 Estados-Membros instalando mais energia solar do que no ano de 2022, com a exceção da Dinamarca. A maior parte da instalação solar no continente europeu ocorreu na UE, com 60,9 GW instalados, correspondendo a 87% do mercado, uma ligeira queda de 0,5 ponto percentual em relação ao ano anterior. A participação dos países fora da UE em 2023 foi de 13%, com base em 9,3 GW de nova capacidade fotovoltaica.

A Índia é um dos países que mais rapidamente estava expandindo sua capacidade de geração de energia solar, aproveitando seu vasto potencial solar e a necessidade crescente de diversificação de sua matriz energética. Após um forte crescimento em 2021 e 2022, o setor solar fotovoltaico da Índia enfrentou mudanças significativas, resultando em uma queda de 28% nas novas instalações no ano de 2023, com 12,5 GW adicionados, em comparação aos 17,4 GW de 2022. Mudanças nas políticas e regulamentações, como revisões de tarifas e impostos sobre módulos solares importados, criaram incertezas que afetaram o planejamento e a viabilidade financeira dos projetos, além de uma pressão do governo para aumentar o uso de componentes solares fabricados no país, que não conseguiu atender às necessidades (SOLARPOWER EUROPE, 2024). Contudo, esses problemas devem ser superados, devido a uma meta do governo indiano alcançar cerca de 50% da capacidade instalada cumulativa de energia elétrica a partir de fontes não baseadas em combustíveis fósseis até 2030 (INDIA, 2023).

O Japão tem sido um pioneiro na adoção de energias renováveis, sendo a energia solar uma fonte de energia alternativa que é gerada no Japão desde o final da década de 90. Após o desastre nuclear de Fukushima em 2011, o país acelerou suas iniciativas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e energia nuclear, e a energia solar emergiu como uma solução chave para alcançar esse objetivo. A introdução do Feed-in Tariff (FiT) em 2012, um programa que garantiu preços fixos para a compra de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, incluindo a energia

solar, acelerou significativamente a instalação de sistemas solares (PORTAL SOLAR, 2024).

Em 2023, o Japão instalou 6,2 GW de capacidade solar, uma queda de 4% em relação aos 6,5 GW de 2022. Desde o seu pico em 2015, quando instalou 10,8 GW que ao final de 2016 acumulou uma capacidade instalada de 42.750 MW, tornando-se a segunda maior do mundo, apenas atrás da China (PORTAL SOLAR, 2024), o Japão tem enfrentado uma tendência de queda nas instalações solares, principalmente devido a descontinuação dos FITs para sistemas de grande escala (SOLARPOWER EUROPE, 2024).

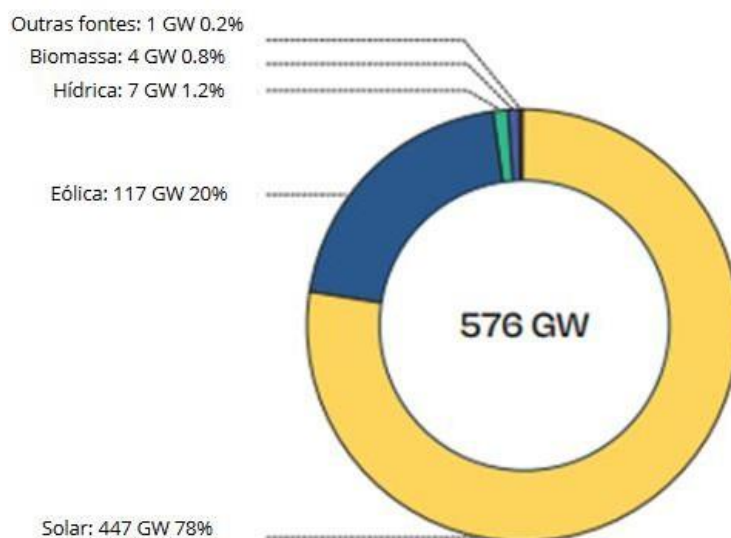
Figura 4 – Ranking dos 10 Países com Maior Capacidade de Geração de Energia Fotovoltaica em 2022.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2024.

A tendência global para os próximos anos é de um crescimento contínuo da energia solar. Em 2023, o mundo adicionou 447 GW de nova capacidade solar instalada, representando 78% de toda nova capacidade renovável instalada, como é possível ver na Figura 5 (SOLARPOWER EUROPE, 2024). Reforçando o papel da energia solar como uma líder estabelecida e em crescimento na transição global para fontes de energia limpa.

Figura 5 – Capacidade de Energia Renovável Instalada no Mundo em 2023.



Fonte: Adaptado de SOLARPOWER EUROPE, 2024.

Esse cenário está relacionado um aumento significativo na capacidade global de fabricação de painéis fotovoltaicos, o que melhorou a disponibilidade dos módulos solares após as dificuldades na cadeia de suprimentos enfrentadas durante a pandemia. Essa expansão na produção gerou um excedente de oferta e reduziu acentuadamente os preços dos componentes do sistema ao longo de 2023, com o custo dos módulos caindo cerca de 50% (SOLARPOWER EUROPE, 2024).

Além disso, a crise energética global continuou a impulsionar a demanda em várias regiões. Governos, indivíduos e empresas passaram a adotar a energia solar como uma solução confiável e econômica para enfrentar os altos preços da energia.

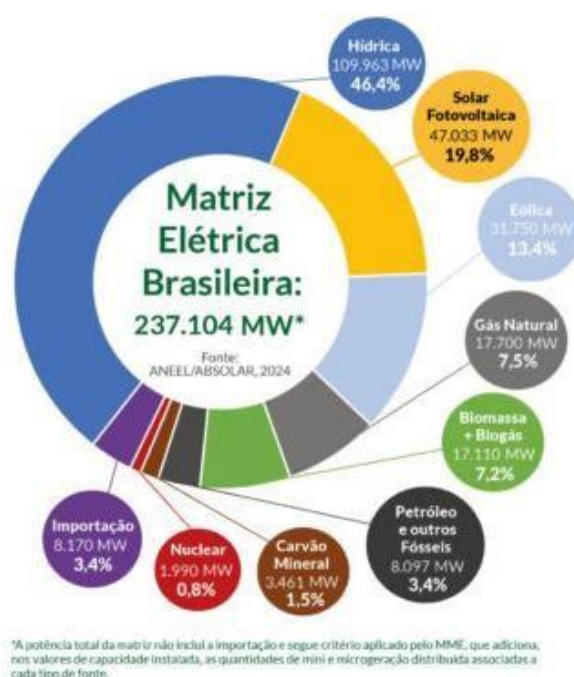
4.1.2 Cenário da Energia Fotovoltaica no Brasil

O Brasil deu início à análise e ao desenvolvimento da energia fotovoltaica em seu sistema energético em 2011, com o Edital de P&D número 13 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (CARSTENS; CUNHA, 2018). O principal objetivo era propor arranjos técnicos e comerciais para a geração de eletricidade a partir da energia solar, criando as bases para o desenvolvimento de infraestrutura e tecnologia que permitissem a integração da energia fotovoltaica no sistema energético nacional (ANEEL, 2011). As iniciativas e resoluções governamentais relacionadas à energia

fotovoltaica no Brasil tinham dois focos principais: fomentar a criação de uma indústria nacional de painéis solares e aumentar a capacidade de geração dessa fonte no país (CARSTENS; CUNHA, 2018).

Desde então, a energia solar no Brasil está em plena ascensão. Segundo a ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, a capacidade instalada do país superou 40 GW em 2024, que equivale a 19,8% da matriz elétrica brasileira, como é possível observar na Figura 6. E segundo o presidente da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), Ronaldo Koloszuk, o Brasil vai alcançar uma capacidade instalada de 121 mil MW, o que representará 32,2% da matriz elétrica nacional, superando a hidreletricidade que terá 113 mil MW (participação de 30,2%).

Figura 6 – Gráfico da Matriz Elétrica Brasileira em setembro de 2024.



Fonte: ABSOLAR, 2024.

A geração distribuída, onde os painéis solares são instalados na própria unidade consumidora ou em pontos próximos, em especial, tem sido destaque, ultrapassando 29 GW de potência instalada em operação no Brasil em 2024. O total de unidades consumidoras beneficiadas com o uso da energia solar ultrapassa 3,7 milhões no país (ABSOLAR, 2024).

O governo brasileiro tem implementado diversas políticas para regulamentar a energia solar, incluindo o Marco Legal da Geração Distribuída, estabelecido pela Lei 14.300 de 6 de janeiro de 2022. A Lei define incentivos para os consumidores que geram sua própria energia a partir de fontes renováveis enviarem o excedente de energia para a rede elétrica. Em troca, eles recebem créditos que podem ser utilizados para reduzir o valor das faturas futuras de energia. Esses créditos são calculados com base na quantidade de energia excedente injetada na rede e são válidos por até 60 meses.

Além dos incentivos, a Lei estabelece as regras para a transição de tarifas custeadas, a partir de janeiro de 2023, os consumidores operadores de sistemas fotovoltaicos passaram a pagar uma porcentagem crescente das tarifas relacionadas à distribuição de energia sobre toda a energia elétrica ativa que eles injetam na rede (energia excedente). Isso significa que, gradualmente, eles passarão a contribuir mais para os custos de manutenção e operação do sistema elétrico, até 2029, os consumidores passarão a pagar 100% das tarifas e encargos estabelecidos.

Por outro lado, o segmento de energia solar centralizada, caracterizado por usinas fotovoltaicas de grande porte em escala de utilidade pública, cresceu quase 50%, atingindo 4,1 GW, impulsionado principalmente por Acordos de Compra de Energia (PPAs) corporativos no mercado não regulado, que oferece oportunidades mais lucrativas do que os tradicionais leilões governamentais (SOLARPOWER EUROPE, 2024).

4.2 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos que convertem a luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Esse processo ocorre graças ao uso de células fotovoltaicas, um módulo fotovoltaico pode conter de 36 a 72 células. As células fotovoltaicas são feitas principalmente de silício, um semicondutor que tem a capacidade de absorver a luz e transformar essa energia luminosa em energia elétrica.

4.2.1 Estrutura dos Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é composto por várias camadas de materiais que desempenham funções diferentes, trabalhando em conjunto para maximizar a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade.

A primeira camada de um módulo é a Camada Superior, que é formada por um vidro temperado especial, altamente resistente a impactos e condições climáticas adversas. Esse vidro é ultrapuro e possui baixo teor de ferro, características que garantem a máxima transmissão de luz e minimizam a reflexão, permitindo que a maior quantidade possível de radiação solar chegue às células fotovoltaicas, o vidro representa cerca de 75% do peso total do módulo (VINAYAGAMOORTHI et al., 2024).

Logo abaixo do vidro, há uma camada de material encapsulante, geralmente feita de EVA (Ethylene Vinyl Acetate), cuja função é proteger as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por fatores externos, como os raios UV, variações de temperatura e a umidade. Esse encapsulante também ajuda a garantir que a luz solar atinja as células fotovoltaicas de maneira eficiente e uniforme. O EVA representa aproximadamente 8% do custo de fabricação do painel solar. (PORTAL SOLAR, 2024).

No coração do módulo, estão as células fotovoltaicas. Essas células são responsáveis pela conversão direta da luz solar em eletricidade. Elas são feitas de materiais semicondutores, como o silício, que quando expostos à luz, absorvem fótons (partículas de luz). A energia dos fótons excita os elétrons no material semicondutor, fazendo com que eles se movimentem, criando uma corrente elétrica. Essa corrente é capturada pelos contatos elétricos das células e transformada em eletricidade utilizável. (PRADO, 2018).

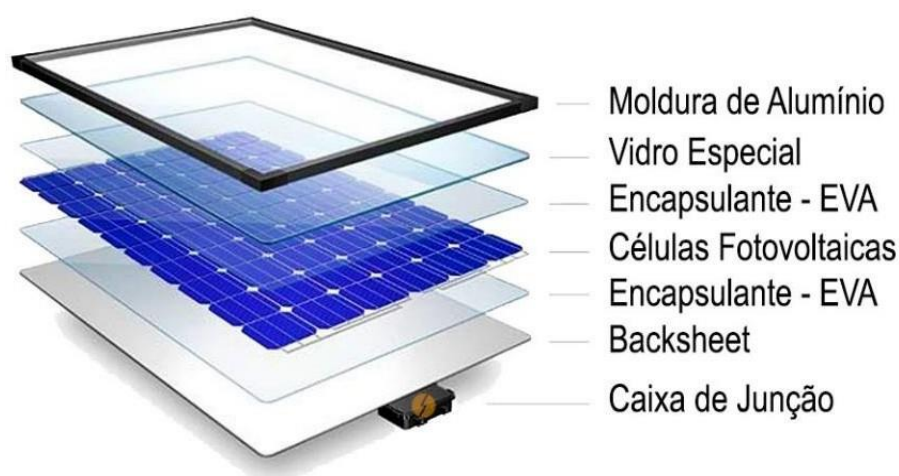
A parte traseira do módulo é chamada de "backsheet" e é feita de um material isolante, geralmente polímeros ou materiais plásticos. Ela tem a função de proteger os componentes internos do módulo contra danos físicos e umidade, além de atuar como um isolante elétrico, prevenindo a perda de corrente. (PORTAL SOLAR, 2024).

Ao redor do módulo, há uma moldura, geralmente feita de alumínio. Ela confere resistência mecânica e leveza ao módulo e serve para proteger o módulo contra danos

externos (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024). Na parte de trás do painel fotovoltaico onde as células fotovoltaicas estão interconectadas em série, fica a caixa de junção, “PV - Junction Box”, é como um gabinete para o módulo, a caixa vai garantir a segurança e o bom funcionamento e interconectar módulos fotovoltaicos (PORTAL SOLAR, 2024).

Por fim, para selar a interface entre o vidro frontal e a moldura de alumínio, são utilizados materiais de vedação, como silicone. Esses selantes garantem que o módulo seja impermeável e resistente à infiltração de água e poeira, aumentando sua vida útil. Na Figura 7 é possível entender as camadas da estrutura de um módulo fotovoltaico.

Figura 7 – Estrutura do Módulo Fotovoltaico.

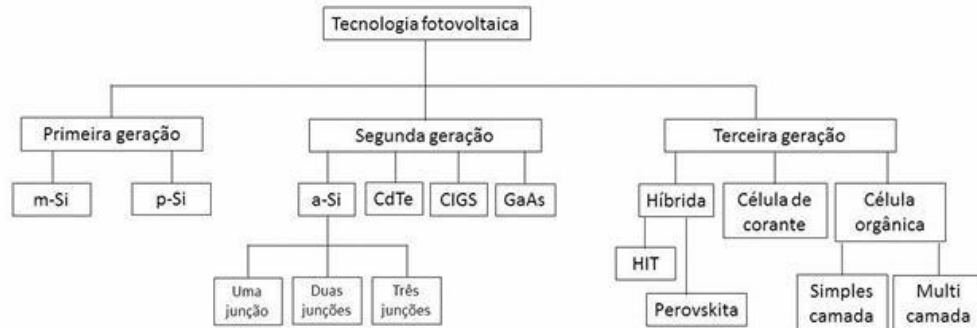


Fonte: PORTAL SOLAR, 2024.

4.3 Tecnologias Fotovoltaicas

Existem várias tecnologias de células fotovoltaicas que variam em eficiência, custo e aplicação. As três principais categorias de tecnologias fotovoltaicas são baseadas em diferentes materiais e métodos de fabricação: silício cristalino, filmes finos e tecnologias emergentes. Essas três categorias também podem ser divididas em gerações, conforme ilustrado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Diagrama para as principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente.



Fonte: BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018

4.3.1 Células Fotovoltaicas de Primeira Geração

A primeira geração de células fotovoltaicas é composta por silício cristalino e arseneto de gálio. Esse nome é atribuído a essas tecnologias porque foram as primeiras a alcançar uso comercial a partir de meados da década de 1950 (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). A primeira geração de células domina o mercado global, representando cerca de 85% a 90% de todas as células fotovoltaicas no mundo, como também oferece as maiores eficiências de conversão, com eficiência máxima das células solares feitas de silício monocristalino de 26,7%, enquanto para o silício multicristalino é de 22,3% (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

A célula solar de silício monocristalino (*m-Si*), é fabricada a partir de um único cristal de silício, obtido por meio do processo Czochralski. Esse método gera lingotes longos de silício, que podem ter de um a vários metros de comprimento. Que então são laminados em discos finos. Tradicionalmente, a eficiência das células solares de silício monocristalino varia entre 17% e 19%. No entanto, com os recentes avanços na fabricação, a eficiência geral de conversão de energia dessas células tem superado 25% (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

As células de silício multicristalino (*p-Si*) são obtidas a partir da solidificação de vários cristais de silício, elas possuem um custo de fabricação menor que as células monocristalinas. A eficiência dessas células pode chegar entre 22% e 23% (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024). Pelo custo mais baixo e pela eficiência

comparável ao *m-Pi*, essas células são as maiores representantes no mercado mundial (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). A Figura 9 a seguir mostra uma comparação entre células de *p-Si* e *m-Si* e sua disposição em módulos fotovoltaicos.

Figura 9 - Comparação entre células de *p-Si* e *m-Si* e sua disposição em módulos fotovoltaicos.



Fonte: BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018

4.3.2 Células Fotovoltaicas de Segunda Geração

A segunda geração das células fotovoltaicas corresponde aos Filmes Finos, é chamada assim por ser uma tecnologia até 100 vezes mais fina que as células de primeira geração, o que diminui a quantidade de material utilizado e cortar custos de maneira expressiva (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

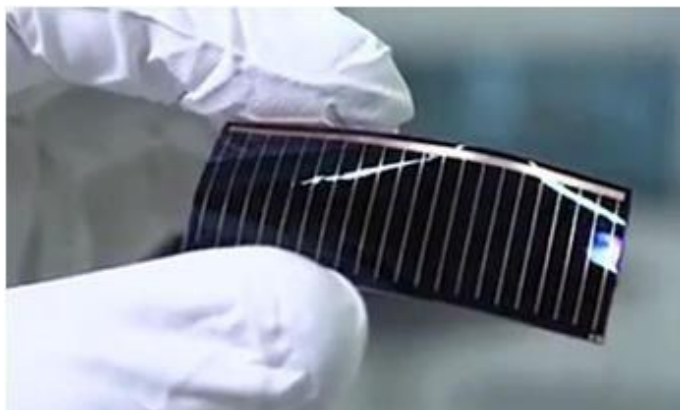
O processo de fabricação das células de segunda geração consiste na deposição de camadas de filme fotossensível em uma base, como vidro, plástico, cerâmica ou metal. A deposição pode ser feita por meio de diversos processos, como pulverização catódica, eletrodeposição, deposição por banho químico (CBD), sublimação em espaço reduzido (CSS) e deposição química a vapor em baixas pressões (LPCVD) (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

As células de Filmes Finos podem ser compostas de 4 tipos de materiais: Silício amorfo (*a-Si*), Arsenieto de Gálio (*GaAs*), Disseleneto de cobre-índio e cobre-índio-gálio (*CIS* e *CIGS*) e Telureto de Cádmio (*CdTe*).

O silício amorfo (*a-Si*) é uma das tecnologias de filme fino mais estudadas no campo fotovoltaico e uma das primeiras a ser produzida industrialmente. A produção dessas células é mais barata por ter uma temperatura de processamento mais baixa, precisar de um material de suporte mais simples e mais barato e por utilizar uma espessura de silício muito mais fina que os módulos de primeira geração (VINAYAGAMOORTHI et al., 2024). As desvantagens estão ligadas a baixa eficiência, entre 6% e 8%, e a degradação inicial da foto corrente em aproximadamente 15% a 20%, entretanto, em locais com temperaturas mais elevadas, a eficiência do *a-Si* pode ter um aumento de até 20 % nos meses mais quentes do ano, devido ao efeito de thermal annealing (recozimento térmico) (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

As células fotovoltaicas de arsenieto de gálio (*GaAs*) são compostas por uma combinação de gálio (*Ga*) e arsênio (*As*), apresentando uma estrutura cristalina que pode ser depositada como filmes finos. Uma das características mais notáveis do *GaAs* é sua resistência ao calor, tornando-o uma escolha ideal para sistemas fotovoltaicos de concentração e aplicações espaciais (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Possuem alta capacidade de absorção, necessitando de apenas alguns micrômetros de espessura para capturar a luz solar. Além disso, tem uma eficiência de conversão de 29%, a mais elevada entre as células de junção única (Kapusta, R., 2014). Contudo, essas células possuem um custo de produção significativamente mais alto, sendo empregado principalmente em situações específicas, onde há uma alta exposição à radiação e temperaturas extremas (Kapusta, R., 2014). Na Figura 10 abaixo temos um exemplo de uma célula de *GaAs* de filme fino.

Figura 10 - Célula de GaAs de filme fino.



Fonte: BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018

O Disseleneto de cobre-índio e cobre-índio-gálio (*CIS* e *CIGS*) são tecnologias que possuem um alto coeficiente de absorção, permitindo captar a maior parte dos fótons incidentes em camadas finas (1 a 3 μm). Essas células oferecem vantagens como alta eficiência de conversão de energia, com o máximo alcançado sendo de 19,2%, estabilidade a longo prazo, e boa resistência ao calor (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

As células fotovoltaicas de Telureto de Cádmio (CdTe) são altamente eficientes devido ao seu elevado nível de absorvidade ótica, permitindo que sejam fabricadas com eficiência próxima ao silício policristalino (p-Si), mas utilizando apenas 1% a 2% do material necessário, por esse motivo o CdTe tem dominado o mercado de células fotovoltaicas de filmes finos desde 2016 (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Esse material pode chegar a uma eficiência de até 22,1%, com uma camada muito fina, uma espessura de cerca de 2 μm (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

4.3.3 Células Fotovoltaicas de Terceira Geração

As células fotovoltaicas de terceira geração representam tecnologias emergentes que combinam conceitos das gerações anteriores, mas que ainda estão em fase inicial e não são amplamente comercializadas. Entre os tipos mais reconhecidos de células solares de terceira geração estão as células solares sensibilizadas por corantes (CSSC), as células orgânicas (OSC), células de perovskita (CSP) e as células de heterojunção (HJT) (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

As células fotovoltaicas sensibilizadas por corantes (CSSC) possuem basicamente uma estrutura dividida em 5 partes, um material semicondutor, duas faces de vidro condutor, um eletrólito, um contra eletrodo e o corante, chamado de sensibilizador. Em uma das faces do vidro condutor, é depositado um filme mesoporoso de óxido semicondutor, que é então sensibilizado com o corante, enquanto na outra face do vidro condutor, é aplicada uma fina camada de platina que funciona como o contra eletrodo. Após a aplicação desses componentes, as duas partes são unidas e o eletrólito é inserido para completar o dispositivo (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

As células sensibilizadas com corantes (CSSC) oferecem várias vantagens, incluindo baixo custo devido ao uso de materiais abundantes como corantes orgânicos, além de sua flexibilidade e transparência, que permitem aplicações inovadoras em superfícies curvas e janelas. Elas também funcionam bem em condições de baixa luminosidade e ambientes sombreados, aumentando sua versatilidade. Entretanto, as CSSC enfrentam desafios significativos, sua eficiência é geralmente menor em comparação com outras tecnologias, variando entre 7% e 12%, com um recorde em laboratório de cerca de 14% (GRAETZ et al., 2001). A durabilidade é comprometida pelo potencial vazamento do eletrólito líquido, e a estabilidade dos corantes pode afetar a performance ao longo do tempo.

As células orgânicas se diferenciam das células solares tradicionais por empregarem materiais orgânicos, como polímeros conjugados ou pequenas moléculas orgânicas, para converter a luz solar em eletricidade, os OSC destacam-se por serem não tóxicos, flexíveis e semitransparentes, características que se tornam ideais para aplicações fotovoltaicas integradas em edificações e dispositivos eletrônicos de baixa potência (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024). Nos últimos anos, a eficiência dessas células aumentou de 10% para até 19% em laboratórios, o que as tornam cada vez mais atrativas para o mercado, porém sua utilização em ambientes externos por conta de problemas de estabilização, penetração de oxigênio e água nas camadas da célula (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

A tecnologia empregada nas células fotovoltaicas de Perovskita (CSP) vem se destacando pela alta eficiência na conversão de energia solar e pelo baixo custo de produção, devido à simplicidade de sua fabricação. Desde 2009, sua eficiência

aumentou de 3% para mais de 25%, tornando-se mais competitivas com as tecnologias de silício, entretanto, a instabilidade da Perovskita é um desafio a ser superado, suas células duram um pouco mais de um ano enquanto uma célula tradicional de primeira geração pode chegar até 30 anos sem grandes perdas de eficiência (JONES, 2023).

As células solares de heterojunção (HJT) representam uma tecnologia de ponta que combina diferentes semicondutores para converter luz solar em eletricidade. Eles utilizam uma estrutura composta por uma base de silício cristalino, com camadas finas de silício amorfo, formando uma heterogênea que maximiza a eficiência de conversão energética (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). As principais vantagens das células HJT incluem sua alta eficiência, com valores que podem ultrapassar 25%, especialmente sob alta radiação solar. Por outro lado, os desafios envolvem o alto custo atual de produção, a necessidade de equipamentos especializados e a complexidade na deposição precisa das camadas de silício amorfo (ROTTERS et al., 2017).

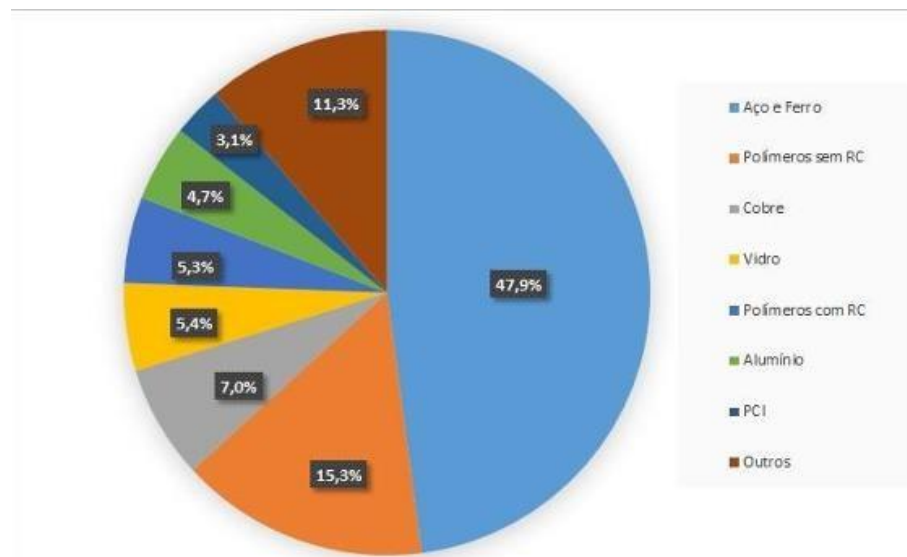
4.4 Caracterização dos Resíduos de Módulos Fotovoltaicos

De acordo com a norma brasileira em vigor (ABNT NBR 10004, 2004), resíduos sólidos são definidos como “resíduos nos estados sólido e semissólido, originados de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição”. A definição é bastante abrangente e inclui diversos tipos de resíduos, incluindo os eletroeletrônicos. A norma também classifica os resíduos de acordo com sua periculosidade, visando uma definição mais precisa da destinação apropriada após o fim de sua vida útil.

O Parlamento Europeu definiu em julho de 2012, através da Diretiva 2012/19/UE, que os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, conhecidos como REEE (ou WEEE, na sigla em inglês para Waste Electrical and Electronic Equipment), referem-se a resíduos gerados a partir de equipamentos eletrônicos amplamente utilizados, como celulares, televisores, computadores e monitores. Além desses, a categoria REEE inclui também resíduos de equipamentos mais especializados, como dispositivos eletrônicos hospitalares, tecnologia da informação e telecomunicações, e painéis fotovoltaicos.

Segundo Dias (2015), a grande diversidade de materiais nos REEE dificulta a generalização de sua composição. No entanto, é comum classificar os materiais presentes em cinco categorias principais: metais ferrosos, metais não-ferrosos, vidro, polímeros e outros. A primeira categoria, que inclui ferro e aço, é a mais predominante nos REEE, representando cerca de 50% da massa total. Em segundo lugar estão os polímeros, que constituem aproximadamente 21% da massa dos REEE, seguidos pelos metais não-ferrosos, que representam cerca de 13%, sendo 7% apenas cobre. A Figura 11 ilustra a distribuição média dos materiais presentes nos REEE.

Figura 11 - Distribuição média dos diferentes tipos de materiais presentes nos REEE.



Fonte: Dias, 2015.

Os módulos fotovoltaicos são classificados como resíduos eletrônicos de Classe I, considerados perigosos (PETROLI et al, 2023).

4.5 Destinação de Resíduos Fotovoltaicos

Devido ao crescente aumento na instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil e no mundo, torna-se fundamental avaliar as opções mais viáveis para a contenção dos resíduos gerados pelos painéis solares ao final de sua vida útil. Gerenciar adequadamente esse fluxo de resíduos é crucial para garantir o descarte seguro de

substâncias perigosas, bem como a recuperação e reciclagem de materiais com alto valor agregado (CRUZ; ISIDORO; FERNANDES, 2020).

A maioria dos painéis solares atualmente em uso é composta por módulos de silício cristalino, representando entre 85% e 90% do mercado global de módulos fotovoltaicos (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024). Diante disso, é possível considerar que a maior parte dos resíduos futuros será composta por materiais de silício cristalino.

De acordo com CONTRERAS-LISPERGUER et al. (2017), grande parte do resíduo eletrônico proveniente dos painéis solares é descartada em aterros de países emergentes, sem o cuidado necessário. Diante da ineficácia no descarte correto dos painéis fotovoltaicos, e dos desafios ambientais associados.

5. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS PARA A REGULAMENTAÇÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A crescente adoção da energia solar fotovoltaica, tanto no Brasil quanto no exterior, levanta questões fundamentais que vão além de sua eficiência e viabilidade econômica, abrangendo também a gestão adequada dos resíduos gerados ao final de sua vida útil. As placas solares, constituídas por materiais como silício, vidro e metais, apresentam desafios significativos em relação ao seu descarte e reciclagem (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024). Nesse contexto, a legislação desempenha um papel crucial, ao estabelecer diretrizes que determinam a responsabilidade de fabricantes, importadores e consumidores.

Este capítulo tem como objetivo investigar as legislações que regulamentam o descarte de resíduos de placas solares em diversos países, incluindo a análise das diretrizes específicas de gestão de resíduos eletroeletrônicos e a logística reversa. Além das normas brasileiras, amplamente influenciadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a investigação incluirá legislações internacionais, como as diretrizes da União Europeia, assim como as práticas adotadas em países como Japão, Estados Unidos e China. A comparação entre esses cenários visa identificar lacunas e oportunidades para aprimorar a gestão de resíduos no Brasil, promovendo a sustentabilidade e a proteção ambiental.

5.1 Cenário da Regulamentação Internacional

As legislações para o descarte de módulos fotovoltaicos ainda estão em desenvolvimento em muitos países, com abordagens variadas ao redor do mundo. Enquanto algumas regiões já possuem regulamentações robustas, outros países estão apenas começando a estruturar políticas específicas para o setor fotovoltaico.

5.1.1 União Europeia

A legislação da União Europeia (UE) relativa ao descarte de módulos fotovoltaicos se destaca entre as mais avançadas globalmente, priorizando o gerenciamento sustentável de resíduos eletrônicos. A norma central que regula esses resíduos é a Diretiva WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive),

promulgada inicialmente em 2002, revisada em 2012 e cuja versão mais recente foi publicada em 2019.

A Diretiva 2012/19/UE (WEEE) estabelece um conjunto abrangente de obrigações, instrumentos de implementação e proibições, visando assegurar o descarte e tratamento adequados desses materiais, com foco na sustentabilidade e na minimização dos impactos ambientais.

- Responsabilidades

A diretiva atribui responsabilidades primordiais aos produtores, que devem financiar os custos associados à coleta, tratamento e reciclagem dos equipamentos que introduzem no mercado, por meio do princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP). Esse princípio assegura que as empresas participem de todo o ciclo de vida dos produtos, desde o design, que facilita a reciclagem, até o descarte. Além disso, distribuidores e consumidores também têm responsabilidades na devolução e na separação apropriada desses resíduos. Os Estados-membros da União Europeia são incumbidos de estabelecer sistemas de coleta e garantir a conformidade por meio de licenciamento e fiscalização.

- Incentivos

Embora a diretiva não preveja subsídios ou incentivos financeiros diretos, a implementação de incentivos pode ocorrer conforme os Estados-membros da União Europeia apliquem a diretiva em seus contextos nacionais, oferecendo incentivos específicos, como subsídios ou benefícios fiscais para empresas que atuam no setor de reciclagem e tratamento de resíduos.

- Instrumentos de Implementação

Os instrumentos delineados pela diretiva incluem a criação de sistemas de coleta separados, que garantem que os consumidores possam descartar seus equipamentos em locais apropriados, de forma gratuita. As metas de coleta e reciclagem estabelecidas variam entre 55% e 85%, dependendo do tipo de equipamento. A inclusão dos módulos fotovoltaicos na revisão de 2014 estipula que

85% do peso de um módulo deve ser reciclado, promovendo a recuperação de materiais como vidro, metais e semicondutores. (VINAYAGAMOORTHY et al., 2024).

Adicionalmente, a diretiva requer o licenciamento de operadores de reciclagem e tratamento, garantindo que as operações sejam realizadas em conformidade com padrões ambientais rigorosos. Para fins de monitoramento, os Estados-membros devem enviar relatórios regulares à Comissão Europeia acerca do fluxo de resíduos, da conformidade dos produtores e do cumprimento das metas estabelecidas.

- Proibições

A diretiva estabelece restrições claras, como a proibição do descarte de REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) com resíduos domésticos não separados e a exportação inadequada de resíduos para países incapazes de garantir tratamento em conformidade com os padrões da UE. Além disso, restringe o uso de substâncias perigosas, como chumbo e mercúrio, na fabricação de módulos fotovoltaicos, contribuindo para que o processo de reciclagem seja menos prejudicial ao meio ambiente e assegurando maior segurança no manuseio dos materiais durante o descarte e a reciclagem.

5.1.2 Estados Unidos

Até o momento não existe uma regulamentação federal específica para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos ao final de sua vida útil nos Estados Unidos. A Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA) é o único regulamento federal que define os padrões para o manuseio de resíduos perigosos e não perigosos, em 2020, uma emenda que permite a exclusão dos painéis solares em fim de vida da classificação como "resíduos perigosos" foi aprovada. Isso foi feito com o objetivo de facilitar o descarte adequado e a reciclagem de painéis solares, promovendo uma economia circular para esses materiais (US EPA, 2023).

A exclusão é válida apenas se os painéis forem gerenciados de maneira que minimize os riscos ao meio ambiente. Algumas condições envolvem o envio dos painéis para centros de reciclagem licenciados ou autorizados para reuso de componentes. A iniciativa foi desenhada para evitar que grandes quantidades de painéis solares, que podem conter pequenas quantidades de materiais perigosos,

sejam classificadas como resíduos perigosos, o que complicaria os processos de descarte e reciclagem (US EPA, 2023).

Entretanto, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA) planeja propor novos requisitos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, em resposta a uma petição apresentada por associações industriais do ramo da energia (US EPA, 2023). Uma alteração na Lei de Conservação e Recuperação de Recursos pretende esclarecer as diretrizes para o gerenciamento de módulos solares ao final de sua vida útil, com regulamentos que visam incentivar o desenvolvimento de programas de coleta e reciclagem em níveis municipal e comercial, reduzindo assim o descarte de resíduos fotovoltaicos em aterros sanitários (US EPA, 2023).

Enquanto isso, alguns estados como Washington, Califórnia, Havaí, Carolina do Norte e Nova Jersey estão implementando regulamentações específicas para o manejo de resíduos fotovoltaicos.

No estado de Washington, a Lei de Incentivos Solares (ESSB 5939), promulgada em 2017, implementa o princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), responsabilizando os fabricantes pela coleta e gestão dos módulos fotovoltaicos após o consumo. O objetivo é reduzir o desperdício por meio da reciclagem e criar oportunidades de emprego. Inicialmente, a lei se aplicava a resíduos de módulos residenciais, mas em 2019 foi ampliada para incluir também resíduos comerciais. A Lei HB 2645, promulgada em junho de 2020, exige que os fabricantes apresentem planos de gerenciamento de resíduos e criou um grupo de trabalho para revisar e propor recomendações sobre o fim da vida útil dos módulos. Em complemento, a Lei HB 1393 de 2021 determina que, a partir de 1º de julho de 2025, os painéis solares só poderão ser vendidos no estado se o fabricante tiver um plano de administração aprovado pelo Departamento de Ecologia de Washington.

A Califórnia foi um dos primeiros estados a adotar regulamentos específicos para o gerenciamento de resíduos de energia solar fotovoltaica, em 2015 foi aprovada Lei SB 489 (2015), que permitiu classificar módulos fotovoltaicos como resíduos não perigosos a fim de incentivar a reciclagem deles. Além disso, o Departamento de Controle de Substâncias Tóxicas (DTSC) distribuídas, em 2019, estabeleceu requisitos específicos para a coleta, transporte, armazenamento e tratamento de

resíduos fotovoltaicos, implementando um processo de licenciamento específico para fabricantes de painéis solares (CALIFORNIA, 2024). Somado a isso, desde 2021, o CalRecycle, que é o Departamento de Reciclagem e Recuperação de Recursos da Califórnia, assume a responsabilidade de orientar as atividades relacionadas ao rastreamento, coleta, transporte e reciclagem de resíduos solares ao final de sua vida (NAIN & ANCTIL, 2024).

No Havaí, as Regras Administrativas do Havaí (HAR), Título 11, Capítulo 273 estabelecem que os painéis solares em fim de vida devem ser descartados como resíduos universais. Com procedimentos adequados para coleta, transporte e reciclagem dos painéis, assegurando que componentes perigosos, como metais pesados, sejam manuseados corretamente. A lei proíbe o descarte de painéis solares em aterros sanitários comuns e requer que sejam reciclados em instalações autorizadas para minimizar o impacto ambiental.

A Carolina do Norte, por meio da Lei HB 329 de 2019, estabeleceu que os fabricantes e instaladores de painéis fotovoltaicos são responsáveis pelo descarte e reciclagem adequados ao final da vida útil dos painéis, seguindo regulamentações ambientais específicas e ajudando a criar infraestruturas para coleta e processamento. O Lei sugere que incentivos, como subsídios e créditos fiscais, sejam implementados para fomentar o descarte responsável e a reciclagem, com foco na recuperação de materiais perigosos, mas não os define. Enfatiza, por fim, a importância de políticas estaduais que assegurem a conformidade com as regulamentações ambientais e incentivo o design ecológico.

O estado de Nova Jersey, através da Ordem Administrativa 2020-14 de 2020, criou a Comissão de Reciclagem de Painéis Solares de Nova Jersey, que tem como responsabilidade avaliar as práticas de descarte de painéis solares em Nova Jersey e em outras regiões, recomendar regulamentações e políticas que incentivem a reciclagem de painéis solares, estudar a previsão de programas de reciclagem específicos para painéis solares no estado e identificar e desafios para a reciclagem eficaz e responsável de painéis solares. A Comissão determinou, por meio de um relatório publicado em 2023, uma série de políticas para garantir o descarte adequado e a reciclagem de painéis solares no fim de vida. Foram estabelecidas responsabilidades para fabricantes, instaladores e recicladores. Os fabricantes são

responsáveis por garantir que os painéis solares sejam recicláveis e pelo financiamento de sistemas de reciclagem. Os instaladores devem seguir as diretrizes de descarte correto, enquanto os recicladores precisam processar os painéis de acordo com normas ambientais.

De modo geral, as legislações vigentes nos estados dos Estados Unidos adotam o princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) e classificam os resíduos fotovoltaicos como não perigosos, promovendo a reciclagem. A Tabela 1 a seguir destaca as diferenças entre os estados.

Tabela 1 – Resumo das Regulamentações dos Estados dos Estados Unidos.

	Washington	Califórnia	Havaí	Carolina do Norte	Nova Jersey
Lei	ESSB 5939; Lei HB 2645; Lei HB 1393	Lei SB 489	HAR Título 11, Capítulo 273	Lei HB 329	Ordem Administrativa 2020-14
Entidades Responsáveis	Departamento de Ecologia de Washington	CalRecycle - Departamento de Reciclagem e Recuperação de Recursos da Califórnia	Não	Não	Comissão de Reciclagem de Painéis Solares de Nova Jersey
Responsabilidade e Estendida do Produtor (REP)	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Proibição de Descarte em Aterros Comuns	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Incentivos	Não	Não	Não	Sim	Não
Metas	Planos de administração aprovados até 2025	Não	Não	Não	Não

Fonte: Autora (2024).

5.1.3 China

Na China, a principal regulamentação relacionada aos resíduos sólidos é a Lei Nacional de Resíduos Sólidos, inicialmente promulgada em 1996 e revisada em 2020, que estabelece uma estrutura legal abrangente para a gestão de resíduos sólidos em

todo o país. Um dos principais objetivos da lei é incentivar a redução, reutilização e reciclagem desses resíduos, buscando mitigar seus impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública. Para alcançar esses objetivos, a legislação promove o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias e métodos voltados à redução e reciclagem, além de prever sanções para o descarte inadequado e outras infrações relacionadas à gestão de resíduos (ALI et al., 2023).

Além da Lei Nacional de Resíduos Sólidos, a China conta com a norma GB/T 38785-2020, que define requisitos técnicos gerais para a reciclagem e reutilização de módulos fotovoltaicos de filmes finos utilizados em edifícios. A norma abrange princípios básicos, coleta, transporte, armazenamento, desmontagem, reciclagem e gestão desses módulos, com foco em materiais como telureto de cádmio e seleneto de cobre, índio e gálio. Ela destaca práticas que asseguram a segurança ambiental e a recuperação eficiente de metais e outros componentes importantes desses módulos.

Adicionalmente, em julho de 2023, o governo chinês publicou diretrizes orientadoras sobre a promoção da reciclagem de equipamentos desativados de energia eólica e fotovoltaica. O objetivo é impulsionar a transformação verde do modelo de desenvolvimento, implementando uma estratégia abrangente de conservação e estabelecendo um sistema eficiente de reciclagem para esses equipamentos. Esse sistema abrange desde o design ecológico e a reciclagem padronizada até a utilização de alto valor e o descarte seguro, completando a cadeia produtiva das indústrias eólica e fotovoltaica, com foco em práticas sustentáveis e de baixo carbono.

- Responsabilidades:

A Lei Nacional de Resíduos Sólidos da China, a norma GB/T 38785-2020 e as diretrizes do governo chinês para a reciclagem de equipamentos de energia eólica e fotovoltaica estabelecem responsabilidades específicas para fabricantes, importadores, recicladores e ao governo. Os fabricantes e importadores são obrigados a financiar e implementar sistemas de coleta e reciclagem, garantindo que os produtos em fim de vida sejam recuperados e tratados de forma ambientalmente adequada. Além disso, as empresas devem manter pontos de coleta acessíveis para consumidores e fornecer relatórios regulares às autoridades para monitoramento e

conformidade com as diretrizes ambientais. Os recicladores devem operar em conformidade com as normas ambientais, garantindo uma recuperação segura e eficiente de materiais. Já o governo local é encarregado de desenvolver a necessidade de infraestrutura e supervisionar a conformidade com as práticas regulamentadas.

- Incentivos:

A Lei Nacional de Resíduos Sólidos da China e as diretrizes do governo chinês para a reciclagem de equipamentos de energia eólica e fotovoltaica instituem incentivos para promover a adesão de fabricantes e importadores ao sistema de reciclagem. Entre os incentivos estão subsídios financeiros e apoio governamental para empresas que desenvolvem sistemas eficazes de coleta e reciclagem. Além disso, empresas que cumprem as exigências e demonstram práticas sustentáveis podem se beneficiar de reduções fiscais e reconhecimento público, recebendo certificações e incentivos que visam estimular a responsabilidade ambiental no setor. Já a norma GB/T 38785-2020 não estabelece incentivos financeiros ou benefícios diretos. Em vez disso, ela define padrões técnicos e operacionais para garantir a reciclagem segura e eficiente de módulos fotovoltaicos.

- Instrumentos:

A Lei Nacional de Resíduos Sólidos da China, juntamente com as diretrizes do governo chinês para a reciclagem de equipamentos de energia eólica e fotovoltaica, define instrumentos essenciais para assegurar sua implementação eficaz. O principal deles é o princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), que exige que fabricantes e importadores financiem e operem sistemas de coleta e reciclagem. A lei também estabelece mecanismos de regulamentação e supervisão, exigindo que as empresas enviem relatórios periódicos e se submetam a auditorias por parte do governo. Além disso, promove o desenvolvimento de infraestruturas acessíveis de coleta e oferece incentivos fiscais e subsídios para empresas que investem em sistemas de reciclagem eficientes.

Enquanto isso, a norma GB/T 38785-2020 estabelece diretrizes técnicas e operacionais para a gestão de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil,

abrangendo coleta, transporte, desmontagem, reciclagem e armazenamento. Ela define normas para garantir a coleta e o transporte seguros, além de padrões para a desmontagem e maximização da reciclagem dos materiais. Também especifica requisitos para o armazenamento seguro dos módulos até que sejam reciclados ou tratados.

- Proibições:

A Lei Nacional de Resíduos Sólidos da China, a norma GB/T 38785-2020 e as diretrizes do governo chinês para a reciclagem de equipamentos de energia eólica e fotovoltaica estabelecem diversas proibições para garantir o manejo adequado dos resíduos eletrônicos. O descarte inadequado desses produtos em aterros comuns ou locais não autorizados é proibido, assegurando que os resíduos sejam tratados de forma correta. Além disso, fabricantes que não possuem planos de reciclagem aprovados estão impedidos de comercializar seus produtos no mercado. A operação de instalações de reciclagem que não atendam aos padrões ambientais estabelecidos também é vedada, garantindo a proteção ambiental e a conformidade com as regulamentações.

- Metas:

Na Lei Nacional de Resíduos Sólidos da China e na norma GB/T 38785-2020 não é estabelecido um percentual ou nível numérico específico de recuperação e reciclagem de materiais diretamente em seu texto. Em vez disso, a lei exige que fabricantes e recicladores atuem de maneira a maximizar a recuperação de materiais, conforme os padrões ambientais e as diretrizes do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT), que monitora o progresso e ajusta as metas conforme necessário para alcançar os objetivos ambientais.

Para as diretrizes para a reciclagem de equipamentos de energia eólica e fotovoltaica, o governo chinês estabeleceu que, até 2025, o mecanismo de responsabilidade para o descarte de equipamentos em centrais fotovoltaicas será amplamente implementado, e as normas e regulamentos relacionados à reciclagem desses equipamentos serão aprimorados. Além disso, avanços tecnológicos deverão ser alcançados para melhorar a recuperação de recursos. E até 2030, espera-se que

o sistema de reciclagem para todo o processo esteja consolidado, com um modelo de reaproveitamento de recursos mais desenvolvido, e as capacidades de reciclagem totalmente ajustadas à escala de descomissionamento. Padrões e especificações também serão aprimorados, elevando significativamente o nível de reciclagem de recursos nas indústrias eólica e fotovoltaica, com a criação de clusters industriais voltados para a reciclagem.

5.2 Cenário da Regulamentação Brasileira

Assim como a maioria dos países produtores de energia solar fotovoltaica, o Brasil não possui normas específicas para o gerenciamento desses resíduos. Dessa forma, o destino pós-consumo é regulamentado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010, seus decretos regulamentares sobre logística reversa e pelo Acordo Setorial de Eletroeletrônicos de 2019, que trata da gestão de produtos eletrônicos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. No caso de resíduos eletroeletrônicos e seus componentes, o Artigo 33, regulamentado pelo Decreto nº 10.388 de 2020, determina que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes devem estruturar e implementar sistemas de logística reversa. Esse processo envolve o retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, independentemente do serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos.

O Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, estabelece:

Art. 4º O objeto deste Decreto é a estruturação, a implementação e a operacionalização de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico existentes no mercado interno. (BRASIL, 2020).

Painéis fotovoltaicos estão listados como produtos eletroeletrônicos de uso doméstico sujeitos à logística reversa, conforme o anexo 1. No entanto, o uso do termo "doméstico" pode gerar ambiguidade e insegurança jurídica quanto à obrigatoriedade da logística reversa.

Diante da ambiguidade na definição de resíduos eletroeletrônicos, dois projetos de lei estão em tramitação para regulamentar os painéis fotovoltaicos: o PL nº 3784 de 2023 e o PL nº 998 de 2024. O PL nº 3784, sugere uma simples inclusão do inciso “VII - painéis solares fotovoltaicos” no Artigo 33 da PNRS.

Já o PL nº 998 de 2024, estabelece a Política de Incentivo ao Desenvolvimento de Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, e tem como objetivo impulsionar a pesquisa, a inovação tecnológica e a implementação de processos de reaproveitamento, reciclagem e disposição final ambientalmente adequada de seus componentes.

O Art. 4º do PL nº 998 de 2024, estabelece os objetivos da Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, que incluem maximizar a reciclagem dos componentes dos painéis, minimizar impactos ambientais adversos e promover o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem mais eficientes. A política também visa criar uma cadeia segura de transporte e triagem dos painéis, incentivar o uso de materiais reciclados em novos produtos, e promover campanhas de conscientização sobre a importância da reciclagem. Além disso, busca fortalecer colaborações entre governo, indústria e instituições de pesquisa, estabelecer normas de qualidade e segurança, garantir adesão por meio de certificações, desenvolver um modelo econômico sustentável para a logística reversa e definir normas claras sobre a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos painéis.

O Art. 5º do PL nº 998 de 2024 define os instrumentos da Política, que incluem fundos e linhas de financiamento dedicados à pesquisa e implementação da logística reversa, sistemas de certificações, incentivos fiscais e tributários, além de um ambiente regulatório experimental, conforme o Marco Legal das Startups, da Lei Complementar nº 182, de 1º de junho de 2021.

O PL nº 998 de 2024 determina no Art. 6º que, os órgãos e entidades competentes da Administração Pública Federal direta e indireta deverão editar normas e regulamentos complementares, incluindo critérios de elegibilidade e formas de acesso a linhas de financiamento e benefícios fiscais. Além disso, devem promover a integração com políticas e programas correlatos para alavancar sinergias, desenvolver mecanismos de articulação com outros entes federativos e o setor

privado, criar indicadores de desempenho para cada objetivo, e estabelecer procedimentos de monitoramento e avaliação periódica, assegurando a publicidade dos resultados.

Por fim, o Art. 7º do PL nº 998 de 2024, altera o inciso VI do Artigo 33 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que passa a ter a seguinte redação: "Art. 33... VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes, incluídos os painéis fotovoltaicos."

Ao comparar os dois projetos de lei, fica evidente que o PL nº 998 de 2024 é mais abrangente em relação ao PL nº 3784 de 2023. Enquanto o PL nº 3784 propõe apenas a inclusão dos painéis fotovoltaicos no inciso da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o PL nº 998 sugere uma política mais detalhada de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, abordando diretrizes e mecanismos para promover a reciclagem, reaproveitamento e destinação adequada desses resíduos.

Além dos projetos de lei mencionados, o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos, firmado em 2019, também abrange os painéis fotovoltaicos. Esse acordo estabelece diretrizes para a logística reversa de produtos eletroeletrônicos, incluindo os módulos solares, complementando as propostas legislativas. O Acordo estabelece o Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP) como um órgão responsável por monitorar e avaliar o cumprimento das metas de logística reversa. O GAP reúne representantes do governo, empresas participantes e outros atores relevantes, e é encarregado de verificar a implementação das obrigações definidas no acordo, como o desempenho na coleta e reciclagem de produtos eletroeletrônicos.

O Acordo Setorial para a Logística Reversa de Eletroeletrônicos estabelece também metas para a expansão da infraestrutura de coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos, incluindo painéis fotovoltaicos. Entre as metas está o estabelecimento de um ponto de coleta para cada 25 mil habitantes e a implementação do sistema de logística reversa em até cinco anos. Após esse período, o sistema deve garantir a coleta de 17% dos produtos comercializados no ano anterior, com 100% dos resíduos coletados sendo destinados de forma ambientalmente adequada. Essas metas de

coleta e destinação devem ser revisadas periodicamente, assegurando a constante evolução e eficiência do processo.

6. ANÁLISE DAS RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO

A aplicação do questionário teve como objetivo entender as práticas adotadas pelas empresas do setor fotovoltaico no descarte de módulos solares e sua familiaridade com a legislação vigente. As informações coletadas oferecem uma visão do cenário atual da gestão de resíduos fotovoltaicos no Brasil, permitindo identificar lacunas, oportunidades de melhoria e tendências no setor.

A primeira pergunta do questionário teve como objetivo compreender os procedimentos adotados pelas empresas para o destino de painéis solares ao final de sua vida útil. Todas as empresas que responderam indicaram que a responsabilidade pela destinação dos resíduos é do cliente, o que evidencia o desconhecimento sobre a política vigente de logística reversa e da responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, comerciantes, instaladores e consumidores no gerenciamento desses resíduos. A Tabela 2 apresenta uma síntese das respostas obtidas.

Tabela 2 – Respostas da Pergunta 1 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Não possuem procedimentos; os módulos são de responsabilidade do cliente.	Os painéis são responsabilidade do cliente.	Os painéis são responsabilidade do cliente.	Não possuem procedimentos; os módulos são de responsabilidade do cliente.

Fonte: Autora, 2024.

A segunda pergunta do questionário investigou como as empresas lidaram com módulos danificados durante o transporte ou instalação e se existe um processo específico para descarte ou substituição. As empresas A e D afirmaram que devolvem os módulos ao fornecedor, mas desconhecem o procedimento após a devolução. A empresa A também revelou que alguns módulos variados foram reformados e usados como decoração no escritório. A empresa C relatou que alguns casos de módulos danificados foram armazenados, enquanto a empresa B informou que nunca houve essa situação e, portanto, não possui um procedimento definido. Um resumo das respostas pode ser encontrado na Tabela 3.

Mesmo que os módulos não tenham um destino inadequado, como no caso da Empresa A, que são utilizados como decoração, sendo transformados em quadros, ou da Empresa C, que são armazenados em depósitos, é fundamental que ocorra a devolução ao fornecedor. Isso garante o funcionamento adequado do sistema de logística reversa e possibilita o reaproveitamento de materiais valiosos presentes nas placas, como a prata e o silício.

Tabela 3 – Respostas da Pergunta 2 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
O procedimento é devolver para o fornecedor.	Sem procedimentos estabelecidos.	Os módulos danificados ficam armazenados na empresa.	O procedimento é devolver para o fornecedor.

Fonte: Autora, 2024.

A terceira pergunta tratava do conhecimento das empresas sobre as legislações vigentes e a aplicação do princípio da responsabilidade compartilhada na gestão dos módulos. Nenhuma das empresas entrevistadas estava ciente das normas que determinam a obrigatoriedade da implementação de sistemas de logística reversa para resíduos eletroeletrônicos, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010). Esse desconhecimento foi observado em todas as empresas, inclusive na Empresa C, com mais de 30 anos de experiência no mercado, que, teoricamente, já deveria lidar com módulos fotovoltaicos próximos do fim de sua vida útil. Vale ressaltar que o desconhecimento das leis e normas não isenta as empresas de suas responsabilidades legais.

Tabela 4 – Respostas da Pergunta 3 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
A empresa não estava ciente das normas vigentes.	A empresa não estava ciente das normas vigentes.	A empresa não estava ciente das normas vigentes.	A empresa não estava ciente das normas vigentes.

Fonte: Autora, 2024.

A quarta pergunta investigou se as empresas possuem parcerias com recicladoras ou programas específicos para a reciclagem de painéis solares. Todas as empresas entrevistadas afirmaram que não têm essas parcerias. Embora isso não seja necessariamente um problema, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), a responsabilidade pela destinação final dos resíduos cabe ao fabricante. No entanto, de acordo com o acordo setorial de 2019, as empresas entrevistadas deverão atuar como pontos de coleta dos resíduos e facilitar o retorno desses materiais ao fabricante. A Tabela 5 mostra um resumo das respostas obtidas.

Tabela 5 – Respostas da Pergunta 4 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
A empresa não possui nenhum tipo de parceria.	A empresa não possui nenhum tipo de parceria.	A empresa não possui nenhum tipo de parceria.	A empresa não possui nenhum tipo de parceria.

Fonte: Autora, 2024.

A quinta pergunta investigou os principais desafios enfrentados pelas empresas na gestão e descarte de painéis solares. A Empresa A, que ainda não teve que descartar módulos, considera que o maior desafio será o tamanho das placas. A Empresa C, com 30 anos de atuação, afirmou não saber quais dificuldades enfrentaria e que os painéis danificados estão armazenados na empresa. As Empresas B e D também desconhecem os possíveis desafios relacionados ao descarte. A Tabela 6 exibe um resumo das respostas coletadas. É possível concluir que o maior desafio para a destinação dos módulos fotovoltaicos atualmente é a adesão ao sistema de logística reversa. Uma vez que esse sistema seja implementado de maneira eficiente, é esperado que novos desafios também surjam ao longo do processo.

Tabela 6 – Respostas da Pergunta 5 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Tamanho das placas solares.	A empresa não sabe quais são os desafios.	A empresa não sabe quais são os desafios.	A empresa não sabe quais são os desafios.

Fonte: Autora, 2024.

Por fim, a sexta pergunta solícita sugestões das empresas para melhorar a gestão e reciclagem de resíduos de painéis solares no Brasil. Apenas a Empresa A apresentou uma sugestão, ressaltando a necessidade de que os fornecedores ofereçam mais informações sobre o descarte e implementem um sistema de rastreamento das placas solares. A Tabela 7 apresenta uma síntese das respostas obtidas.

Tabela 7 – Respostas da Pergunta 6 do Questionário.

EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Os fornecedores devem orientar melhor a empresa e os clientes quanto a questão do descarte e possuírem um sistema para rastrear as placas para a destinação correta no fim da vida.	A empresa não possui sugestões.	A empresa não possui sugestões.	A empresa não possui sugestões.

Fonte: Autora, 2024.

7. SUBSÍDIOS PARA A PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Diante da crescente demanda por energia solar no Brasil e do consequente aumento de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos, torna-se urgente a criação de um regulamento específico para o descarte desses materiais. Embora algumas iniciativas internacionais sirvam como exemplos de boas práticas, o Brasil, um dos 10 maiores geradores de energia solar fotovoltaica, ainda carece de uma legislação clara e abrangente para enfrentar esse desafio.

Um primeiro passo para viabilizar o descarte adequado dos painéis fotovoltaicos é a aprovação dos projetos de lei atualmente em tramitação no Senado e na Câmara dos Deputados, especialmente o PL nº 998 de 2024, que é mais abrangente. Esse marco legal será crucial para definir as responsabilidades de fabricantes, distribuidores e consumidores na destinação adequada dos módulos ao final de sua vida útil, eliminando a ambiguidade presente na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que gera incerteza sobre a inclusão dos painéis solares no processo. Além disso, uma legislação específica permitirá que o Brasil se alinhe às melhores práticas globais, promovendo a sustentabilidade do setor solar.

Além da aprovação da legislação, promover a ampla divulgação da obrigatoriedade da logística reversa, utilizando campanhas informativas e educativas voltadas para diferentes atores do setor, como fabricantes, instaladores, distribuidores e consumidores. A logística reversa envolve uma responsabilidade compartilhada, em que todos os envolvidos no ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos contribuem para garantir o retorno dos produtos aos fabricantes, que, por sua vez, são responsáveis pela destinação adequada, incluindo a reciclagem ou o descarte seguro. Um sistema de logística reversa bem implementado protege o meio ambiente e fomenta a economia circular ao reintegrar materiais reciclados na cadeia produtiva.

Com base nos modelos Acordos Setoriais de outros Eletroeletrônicos já existente no Brasil, sugere-se a criação de um acordo setorial específico para o setor fotovoltaico. Esse acordo envolveria fabricantes, importadores e distribuidores de módulos solares, além de órgãos reguladores e entidades ambientais, com o objetivo de estabelecer metas de coleta, promover a reciclagem e definir as responsabilidades

de cada parte envolvida. Também se propõe a criação de um fundo financeiro para custear as operações de logística reversa, cujo custo seria embutido no preço final dos módulos. Essa medida incentivaria a colaboração entre os diversos atores do setor e promoveria soluções inovadoras para o gerenciamento sustentável dos resíduos fotovoltaicos.

Para garantir um sistema de rastreabilidade eficiente, recomenda-se o cadastro dos módulos fotovoltaicos na unidade consumidora, com o auxílio das distribuidoras de energia, que já possuem dados sobre as instalações solares. Esse cadastro permitiria monitorar os módulos ao longo de sua vida útil e facilitar a destinação correta ao final do ciclo. Além disso, inspirado na legislação do estado de Washington, nos Estados Unidos, sugere-se que fabricantes e importadores apresentem um plano detalhado para a administração de resíduos, incluindo estratégias para adesão à logística reversa e reciclagem dos módulos, metas de coleta e técnicas de reaproveitamento de materiais. Os fabricantes e importadores também seriam responsáveis por submeter relatórios anuais às autoridades reguladoras, detalhando o destino dos módulos, a logística reversa realizada e o cumprimento das metas previstas, assegurando transparência e monitoramento eficaz do processo.

Além disso, para incentivar a criação de soluções de reciclagem, sugere-se a concessão de incentivos fiscais, como deduções de impostos, redução de tarifas de importação para equipamentos de reciclagem e benefícios fiscais para empresas que investirem em pesquisa e inovação no setor. Esses incentivos são fundamentais para viabilizar economicamente a reciclagem em larga escala e estimular o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o setor fotovoltaico.

Para assegurar o cumprimento dessas diretrizes, é fundamental a definição de metas progressivas para a coleta e reciclagem de módulos fotovoltaicos, levando em consideração a vida útil média dos painéis. Por exemplo, poderia ser estabelecido que, após 20 anos do ano base, as empresas importadoras recolham e destinem adequadamente 35% dos módulos comercializados. Além disso, o consumidor poderia receber um certificado de destinação adequada, emitido pelas empresas importadoras, ao devolver o módulo, comprovando o descarte correto.

Por fim, propõe-se um sistema de depósito e retorno, onde uma taxa de depósito seria cobrada na compra do módulo e devolvida ao consumidor no momento do descarte adequado. Caso o módulo não fosse devolvido para reciclagem, a taxa contribuiria para o fundo de logística reversa, incentivando a destinação correta e criando uma cadeia de retorno automatizada.

Esses subsídios visam construir uma estrutura para o gerenciamento sustentável dos resíduos fotovoltaicos no Brasil, promovendo a economia circular e incentivando a inovação no setor de energia renovável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A evolução tecnológica fotovoltaica e seus benefícios ao Brasil ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/a-evolucao-tecnologica-fotovoltaica-e-seus-beneficios-ao-brasil/>. Acesso em set. 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) – **Relatórios e Indicadores** AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores>. Acesso em set. 2024.

Ali, A. et al. **Policies and regulations for solar photovoltaic end-of-life waste management: Insights from China and the USA**. *Chemosphere*, v. 340, 1 nov. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523021094>. Acesso em out. 2024.

Bogacka, M.; Pikoń, K.; Landrat, M. **Environmental impact of PV cell waste scenario**. *Waste Management*, v. 70, p. 198–203, 1 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17306712>. Acesso em ago. 2024.

Brasil atinge 15 GW de potência instalada de energia solar ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-sambiental-com-br-noticias-brasil-alcanca-15-gw-de-potencia-instalada/>. Acesso em set. 2024.

Brasil bate recorde de importação de painéis solares no 1º semestre de 2024. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-portalsolar-com-br-noticias-mercado-brasil-bate-recorde-de-importacao-de-paineis-solares-no-1o-semester-de-2024/>. Acesso em set. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa n. 1059, de 23 de maio de 2023. Estabelece critérios e procedimentos**

para a implementação da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em out. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei n. 2456/2023. Institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos.** Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=242375>
1. Acesso em out. 2024.

BRASIL. **Decreto n. 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Estabelece a estruturação e a implementação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 fev. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm. Acesso em out. 2024.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em out. 2024.

BRASIL. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica e dispõe sobre o sistema de compensação de energia elétrica;** altera as Leis n. 5.655, de 20 de maio de 1971, e n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em out. 2024.

BRASIL. **Logística Reversa de Eletroeletrônicos. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR).** Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/eletroeletronicos/>. Acesso em out. 2024.

BRASIL. **Senado Federal. Carlos Viana propõe logística reversa para painéis solares.** *Senado Notícias*, 16 ago. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/08/16/carlos-viana-propoe-logistica-reversa-para-paineis-solares>. Acesso em out. 2024.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei do Senado n. 158987/2023. Propõe logística reversa para painéis solares.** Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/158987>. Acesso em out. 2024.

CALIFORNIA. **Department of Toxic Substances Control. Photovoltaic modules (PV modules) universal waste management regulations.** Disponível em: <https://dtsc.ca.gov/photovoltaic-modules-pv-modules-universal-waste-management-regulations/>. Acesso em set. 2024.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL. Regulations. Disponível em: <https://dtsc.ca.gov/regs/>. Acesso em set. 2024.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL. **Universal Waste Management of PV Modules Webinar.** 17 dez. 2020. Disponível em: <https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2020/12/Universal-Waste-Management-of-PV-Modules-Webinar-12.17.2020.pdf>. Acesso em set. 2024.

CALIFORNIA STATE LEGISLATURE. **Senate Bill 489: An act to amend Section 25259 of the Health and Safety Code, relating to hazardous waste.** [Califórnia], 2015. Disponível em: http://www.leginfo.ca.gov/pub/15-16/bill/sen/sb_0451-0500/sb_489_bill_20150901_enrolled.html. Acesso em set. 2024.

CHINA. **China issues guidelines on recycling wind-power, photovoltaic equipment.** *English.gov.cn*, 17 ago. 2023. Disponível em: https://english.www.gov.cn/news/202308/17/content_WS64dddc1cc6d0868f4e8dea32.html. Acesso em out. 2024.

CHINA DAILY. **China issues guidelines on recycling wind power, photovoltaic equipment.** *China Daily*, 17 ago. 2023. Disponível em:

<https://www.chinadaily.com.cn/a/202308/17/WS64ddd152a31035260b81cbbc.html>.

Acesso em out. 2024.

CHINA. Guiding Opinions on Promoting the Recycling and Treatment of Waste Equipment for Wind and Photovoltaic Power Generation. *The State Council of the People's Republic of China*, 2023. Disponível em: https://www.gov.cn/zhengce/202308/content_6898749.htm. Acesso em out. 2024.

CHINA. Notice on Orderly Promotion of Photovoltaic and Wind Power Project Development and Utilization. *The State Council of the People's Republic of China*, 2023. Disponível em: https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6899065.htm. Acesso em out. 2024.

CHINA. Pareceres orientadores da Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma e outros departamentos sobre a promoção da reciclagem de energia eólica e equipamentos fotovoltaicos desativados. *The State Council of the People's Republic of China*, 2023. Disponível em: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6898747.htm. Acesso em out. 2024.

CHINA. The state has introduced measures to promote the recycling of retired wind power and photovoltaic equipment. *The State Council of the People's Republic of China*, 2023. Disponível em: https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6898744.htm. Acesso em out. 2024.

Congresso aprova maior investimento em energia renovável da história dos EUA
PORTAL SOLAR. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/politica/politica-internacional/congresso-aprova-maior-investimento-em-energia-renovavel-da-historia-dos-eua>. Acesso em set. 2024.

Contreras-Lisperguer, R. et al. **Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels.** *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 51–59,

1 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617319479>. Acesso em ago. 2024.

Cruz, F. T.; Isidoro, M. H.; Fernandes, I. S. **Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos**. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 9, p. 73294–73309, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/17469>. Acesso em ago. 2024.

Demanda por energia solar crescendo 20%. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-panoramamercantil-com-br-demanda-por-energia-solar-crescendo-20/>. Acesso em set. 2024.

De Sousa, N. M.; Oliveira, C. B.; Cunha, D. **Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles**. *Social Sciences and Humanities OpenElsevier Ltd*, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259029112300061X>. Acesso em ago. 2024.

Dhoke, A.; Sharma, R.; Saha, T. K. **PV module degradation analysis and impact on settings of overcurrent protection devices**. *Solar Energy*, v. 160, p. 360–367, 15 jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1731085X>. Acesso em ago. 2024.

Diretor, R.; Pepitone da Nóbrega, A. **Proposta de chamada de projeto de P&D Estratégico no 13/2011: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção de projetos de geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/aavs2011sn152.pdf>. Acesso em set. 2024.

Divya, A. et al. **Review on recycling of solar modules/panels**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier B.V., 1 maio 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822005682>. Acesso em ago. 2024.

Energia solar no Brasil: dados e previsões. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-folhape-com-br-especiais-folha-energia-energia-solar-355857/>. Acesso em set. 2024.

European Union. **Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).** Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>. Acesso em out. 2024.

Fernandes Coelho, T.; Carlos, J.; Serra, V. **Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais.** Disponível em: <https://www.revistasuninter.com/revistameioambiente/index.php/meioAmbiente/articloe/view/820>. Acesso em ago. 2024.

Gerold, E.; Antrekowitsch, H. **Advancements and Challenges in Photovoltaic Cell Recycling: A Comprehensive Review.** *Sustainability (Switzerland)*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 mar. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2542>. Acesso em ago. 2024.

Gil Luís; Isidro João. **O fim de vida dos módulos fotovoltaicos.** *RenováveisMagazine*, 2019. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/36189/1/O%20fim%20de%20vida%20dos%20m%C3%B3dulos%20fotovoltaicos.pdf>. Acesso em ago. 2024.

Goh, K. C. et al. **Harvesting valuable elements from solar panels as alternative construction materials: A new approach of waste valorization and recycling in circular economy for building climate resilience.** *Sustainable Materials and Technologies*, v. 36, 1 set. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993724002100>. Acesso em set. 2024.

Grätzel, Michael. **Photoelectrochemical cells**. 2001. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/35104607>. Acesso em ago. 2024.

G1. Aneel corrige dados e ajusta patamar de bandeira vermelha; aumento na conta será menor. G1, 4 set. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2024/09/04/aneel-corrige-dados-e-ajusta-patamar-de-bandeira-vermelha-aumento-na-conta-sera-menor.ghtml>. Acesso em set. 2024.

Hawaii State Department of Health. **Title 11, Chapter 273.1: Standards for Universal Waste Management. 2021.** Disponível em: <https://health.hawaii.gov/shwb/files/2021/06/11-273.1.pdf>. Acesso em set. 2024.

Hawaii State Department of Health. **Title 11, Chapter 273.1: Standards for Universal Waste Management (Guidebook with Track Changes).** 7 jun. 2021. Disponível em: <https://health.hawaii.gov/shwb/files/2021/06/11-273.1-June-7-2021-guidebook-with-track-changes.pdf>. Acesso em set. 2024.

Hei, K. K. et al. **The necessity for end-of-life photovoltaic technology waste management policy: A systematic review.** *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, 5 jul. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624019450>. Acesso em out. 2024.

International Solar Alliance. **Annual Report 2023.** Disponível em: <https://isolaralliance.org/uploads/docs/64d1bd14ec7bf6306a9e45b4f04f38.pdf>. Acesso em set. 2024.

IRENA. **Renewable Energy Statistics 2024.** Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf. Acesso em set. 2024.

Jain, S.; Sharma, T.; Gupta, A. K. **End-of-life management of solar PV waste in India: Situation analysis and proposed policy framework.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 153, 1 jan. 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121010431>. Acesso em set. 2024.

Jones, Frances. **A corrida pelas células solares de perovskita**. 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-corrida-pelas-celulas-solares-de-perovskita/>. Acesso em ago. 2024.

Kayla Kilgo, M. et al. **Metal leaching from Lithium-ion and Nickel-metal hydride batteries and photovoltaic modules in simulated landfill leachates and municipal solid waste materials**. *Chemical Engineering Journal*, v. 431, 1 mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721053985>. Acesso em set. 2024.

Lima, G. A. M. de; Souza, V. O.; Lopes, R. S. **Tecnologias emergentes para produção de células solares fotovoltaicas: uma revisão**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 17, p. e139111736068, 23 dez. 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/36068/32138/422894>. Acesso em ago. 2024.

Limp Nascimento, R. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/centro-universitario-mauricio-de-nassau/engenharia-eletrica/energia-solar-limp/7919912>. Acesso em set. 2024.

Mahmoudi, S.; Huda, N.; Behnia, M. **Critical assessment of renewable energy waste generation in OECD countries: Decommissioned PV panels**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 164, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920304626>. Acesso em out. 2024.

Mendes, L. F. R.; Sthel, M. S.; Lima, M. A. **O crescimento da geração distribuída no contexto da crise hidroenergética na região Sudeste do Brasil: aspectos ambientais e socioeconômicos**. *Revista Vértices*, v. 22, n. 3, p. 626–647, 25 nov. 2020. Disponível em:

<https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/15482>. Acesso em set. 2024.

Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Energia Maio 24**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/boletins-mensais-de-energia/boletins/2024/portugues/boletim-mensal-de-energia-maio-v3.pdf/view>. Acesso em set. 2024.

Monier, V.; Hestin, M. European Commission. **Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive**. 2011. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/weee/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>. Acesso em set. 2024.

Nain, P.; Anctil, A. **End-of-life solar photovoltaic waste management: A comparison as per European Union and United States regulatory approaches**. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, v. 21, 1 maio 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667378924000117>. Acesso em out. 2024.

Negrine Soares Pedroso, R.; Reis dos Santos, L.; Cristina Santos Pires, R. **Um futuro problema com o descarte de painéis solares**. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/732>. Acesso em ago. 2024.

New Jersey Department of Environmental Protection. **Solar Panel Recycling**. Disponível em: <https://www.nj.gov/dep/dshw/solar-panel-recycling/>. Acesso em set. 2024.

New Jersey Department of Environmental Protection. **Administrative Order 2020-14: Solar Panel Recycling. 2020**. Disponível em: https://www.nj.gov/dep/dshw/solar-panel-recycling/resources/sprc_signed_ao_202014.pdf. Acesso em set. 2024.

New Jersey Department of Environmental Protection. **Solar Panel Recycling Library.** Disponível em: <https://www.nj.gov/dep/dshw/solar-panel-recycling/library.html>. Acesso em set. 2024.

New Jersey Department of Environmental Protection. **New Jersey Solar Panel Commission Recommendations.** 29 nov. 2023. Disponível em: <https://www.nj.gov/dep/dshw/solar-panel-recycling/resources/njdep-solar-panel-commission-recommendations-20231129.pdf>. Acesso em set. 2024.

North Carolina Department of Environmental Quality. Solar Energy: **NC Department of Environmental Quality releases HB 329 decommission study.** 2021. Disponível em: <https://farmlaw.ces.ncsu.edu/2021/01/solar-energy-nc-department-of-environmental-quality-releases-hb-329-decommission-study/>. Acesso em set. 2024.

North Carolina Department of Environmental Quality. **HB 329 - Final Report on Decommissioning of Solar Energy Facilities.** 2021. Disponível em: <https://files.nc.gov/ncdeq/Environmental%20Management%20Commission/EMC%20Meetings/2021/jan2021/attachments/AttachA-21-05-H329---FINAL-REPORT-Ellen--1-.pdf>. Acesso em set. 2024.

Oliveira, G. N. de; Seery, M.; Colleran, J. **Células solares sensibilizadas com corante utilizando hibisco e suco de framboesa como tinturas.** *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 3, n. 4, 27 jul. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/24469416030420170665>. Acesso em ago. 2024.

Oliveira, W.; Silva, C.; Balan, D. **Gestão dos resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos.** *Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento*, 23 maio 2023. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2023/I-029.pdf>. Acesso em ago. 2024.

Pereira, M. B. et al. **Simultaneous recycling of waste solar panels and treatment of persistent organic compounds via supercritical water technology.** *Environmental Pollution*, v. 335, 15 out. 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123013337>. Acesso em ago. 2024.

Petroli, P. A. et al. **Avaliação da periculosidade de resíduos de módulos fotovoltaicos por meio da norma brasileira NBR 10004**. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=392&ano=#:~:text=A%20periculosidade%20associada%20a%20pain%C3%A9is,no%20meio%20ambiente%20%C3%A9%20preocupante>. Acesso em set. 2024.

Preet, S.; Smith, S. T. **A comprehensive review on the recycling technology of silicon-based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, 5 abr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624011090>. Acesso em set. 2024.

Rangel Coelho da Rocha, I. **A 3ª geração de coletores solares como candidata a uma energia efetivamente sustentável**. 2022. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/a_3a_geracao_de_coletores_solares_como_candidata_a_uma_energia_efetivamente_sustentavel_0.pdf. Acesso em ago. 2024.

Riahi, S. et al. **Towards net zero emissions, recovered silicon from recycling PV waste panels for silicon carbide crystal production**. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 36, 1 jul. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993723000817>. Acesso em ago. 2024.

Rocha Lana, T. et al. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. Disponível em: <https://periodicos.unis.edu.br/mythos/article/view/467>. Acesso em ago. 2024.

Roters, G. et al. **Heterojunction technology: The solar cell of the future**. Disponível em: https://greenenergy.report/Resources/Whitepapers/77bf0ef9-c6d2-4304-b7c4-90a7662e7318_Heterojunction_Technology_-_The_Solar_Cell_of_the_Future.pdf. Acesso em ago. 2024.

Salazar, R. B. J. et al. **Streamlined process with a sustainable approach for photovoltaic module recycling.** *Sustainable Materials and Technologies*, v. 41, 1 set. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214993724002276>. Acesso em ago. 2024.

Silva, Larissa Correia da et al. **Crescimento da geração distribuída no Brasil e correlação entre os estados.** *Double Blind Review*, v. 10, 2020. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2373>. Acesso em set. 2024.

Solar Power Europe. **Global Market Outlook for Solar Power.** Disponível em: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2024-2028>. Acesso em set. 2024.

Souza, V.; Rodrigues Figueiredo, A. M.; Santos Bortolucci Espejo, M. M. dos. **Challenges and strategies for managing end-of-life photovoltaic equipment in Brazil: Learning from international experience.** *Energy Policy*, v. 188, 1 maio 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421524001113>. Acesso em set. 2024.

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 ago. 2024.

United States Environmental Protection Agency. **Summary of the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA).** EPA, 1976. Disponível em: [https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-resource-conservation-and-recovery-act#:~:text=\(1976\),of%20non%2Dhazardous%20solid%20wastes](https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-resource-conservation-and-recovery-act#:~:text=(1976),of%20non%2Dhazardous%20solid%20wastes). Acesso em out. 2024.

United States Environmental Protection Agency. **Improving recycling and management of renewable energy wastes: universal waste regulations for solar panels and lithium batteries.** Estados Unidos, 2023. Disponível em:

<https://www.epa.gov/hw/improving-recycling-and-management-renewable-energy-wastes-universal-waste-regulations-solar>. Acesso em out. 2024.

United States Environmental Protection Agency. **End of life solar panels: regulations and management**. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>. Acesso em out. 2024.

United States Environmental Protection Agency. **Final solar panel universal waste cover letter and petition**. 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-07/Final_Solar_Panel_Universal_Waste_Cover_Letter_and_Petition_508.pdf. Acesso em out. 2024.

Vinayagamoorthi, R. et al. **Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 12, n. 1, 1 fev. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723024545>. Acesso em ago. 2024.

Washington State Department of Ecology. **Solar Panels**. Disponível em: <https://ecology.wa.gov/waste-toxics/reducing-recycling-waste/our-recycling-programs/solar-panels>. Acesso em out. 2024.

Washington State Legislature. **House Bill 2645-S: Relating to photovoltaic module stewardship and takeback program**. [Washington], 2020. Disponível em: <https://lawfilesexxt.leg.wa.gov/biennium/2019-20/Pdf/Bills/Session%20Laws/House/2645-S.SL.pdf#page=1>. Acesso em out. 2024.

Washington State Legislature. **Senate Bill 5939-S.E: Promoting a sustainable, local renewable energy industry through modifying renewable energy system tax incentives and providing guidance for renewable energy system component recycling**. [Washington], 2017. Disponível em: <https://lawfilesexxt.leg.wa.gov/biennium/2017-18/Pdf/Bill%20Reports/Senate/5939-S.E%20SBR%20FBR%2017%20E3.pdf>. Acesso em out. 2024.

Washington State Legislature. **House Bill 1393: Relating to the photovoltaic module stewardship and takeback program.** [Washington], 2021. Disponível em: <https://lawfilesexternal.wa.gov/biennium/2021-22/Htm/Bill%20Reports/House/1393%20HBR%20PL%2021.htm>. Acesso em out. 2024.

Washington State Legislature. **Revised Code of Washington (RCW) 70A.510.010: Photovoltaic module stewardship and takeback program.** [Washington], 2021. Disponível em: <https://app.leg.wa.gov/rcw/default.aspx?cite=70A.510.010>. Acesso em out. 2024.

Weckend, Stephanie; Heath, Garvin; Wade, Andreas. **End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels.** Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em ago. 2024.

Yadav, D.; Kumar Saraf, A.; Singh Rathee, N. **Assessment of PV waste generation in India.** *Materials Today: Proceedings*, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532301801>. Acesso em set. 2024.

ANEXOS

ANEXO A – Questionário Enviado Para As Empresas.

Prezados(as),

Meu nome é Gabriela, sou estudante de Engenharia Ambiental na UNESP de Rio Claro - SP e estou desenvolvendo meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) sobre a gestão e destinação dos resíduos de painéis solares.

Gostaria de contar com a colaboração de sua empresa para responder algumas perguntas relacionadas ao destino dos painéis solares após o término de sua vida útil ou em caso de danos durante a instalação. O objetivo é compreender melhor os procedimentos adotados e a existência de normativas ou práticas específicas no setor.

Saliento que todas as informações fornecidas serão tratadas de forma confidencial e a empresa não será identificada no trabalho. A pesquisa tem apenas fins acadêmicos e busca contribuir para um melhor entendimento do tema no Brasil.

As respostas podem ser enviadas da maneira que for mais conveniente para vocês: via WhatsApp, e-mail, em áudios ou textos.

Desde já, agradeço imensamente a sua disponibilidade e colaboração.

QUESTIONÁRIO:

1 - Quais são os procedimentos adotados pela sua empresa para a destinação dos painéis solares que chegam ao final de sua vida útil? Ou fica na responsabilidade do cliente?

2- Como a empresa lida com módulos que são danificados durante o transporte ou a instalação? Existe um processo específico para o descarte ou substituição desses painéis?

3- A empresa está ciente da **Responsabilidade Compartilhada** estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e da **Resolução CONAMA nº 452/2012**, que regulamenta a logística reversa de produtos eletroeletrônicos? Se sim, como esses regulamentos são aplicados na gestão e descarte de módulos fotovoltaicos?

4- A empresa possui alguma parceria com empresas de reciclagem ou programas específicos para a reciclagem de painéis solares? Se sim, como funciona essa parceria?

5- Quais são os principais desafios enfrentados pela empresa na gestão e descarte adequado de painéis solares?

6- Quais sugestões a empresa teria para melhorar a gestão e a reciclagem de resíduos de painéis solares no Brasil?