



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

RAFAEL AUGUSTO SILVA CAVALCANTI

**Ações para mitigar o impacto ambiental com o envelhecimento de
módulos de silício fotovoltaico, com propostas de ações para viabilizar
empresas de logística reversa e reciclagem, reuso e recuperação dos módulos**

Recife

2025



RAFAEL AUGUSTO SILVA CAVALCANTI

Ações para mitigar o impacto ambiental com o envelhecimento de módulos de silício fotovoltaico, com propostas de ações para viabilizar empresas de logística reversa e reciclagem, reuso e recuperação dos módulos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de energia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de graduando em engenharia de energia

Orientador(a): Emerson Torres Aguiar Gomes
Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cavalcanti, Rafael Augusto Silva.

Ações para mitigar o impacto ambiental com o envelhecimento de módulos de silício fotovoltaico, com propostas de ações para viabilizar empresas de logística reversa e reciclagem, reuso e recuperação dos módulos / Rafael Augusto Silva Cavalcanti. - Recife, 2025.

54 p.

Orientador(a): Emerson Tôrres Aguiar Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Módulos fotovoltaicos. 2. Logística reversa. 3. Reciclagem. 4. Economia circular. 5. Ciclo de vida. I. Gomes, Emerson Tôrres Aguiar. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAFAEL AUGUSTO SILVA CAVALCANTI

**Ações para mitigar o impacto ambiental com o envelhecimento de
módulos de silício fotovoltaico, com propostas de ações para viabilizar
empresas de logística reversa e reciclagem, reuso e recuperação dos módulos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de engenharia de
energia da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de graduando em
engenharia de energia

Aprovado em: 16/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa

Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Janis Joplin Bezerra Galdino

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de agradecer a mim mesmo pela força e dedicação que tive ao longo do curso, não foi um caminho fácil, mas cada obstáculo superado reforçou minha determinação em seguir em frente.

Deixo à Raquel um agradecimento que vai muito além de palavras, obrigado por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei, muito obrigado por celebrar minha vitórias como se fossem suas e por estar sempre presente, mesmo à distância, nas maiores etapas da minha vida.

Agradeço ao professor Emerson, pela orientação, pelo apoio não apenas nesse tcc, mas em toda a graduação. Estendo também meus sinceros agradecimentos à banca examinadora, pelas valiosas contribuições, pelas críticas construtivas e pelas observações que enriqueceram ainda mais este trabalho. Foi uma honra poder contar com a experiência e o olhar técnico de profissionais tão qualificados.

Sou profundamente grato ao Centro de Energias Renováveis e ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, que juntos formaram o pilar da minha formação em Engenharia de Energia. Conseguiram me proporcionar não apenas estrutura e conhecimento técnico de excelência, mas também um ambiente fértil para o desenvolvimento crítico e comprometido com um futuro mais sustentável.

Agradeço também a UFPE que é minha segunda casa desde 2011 quando entrei no ensino fundamental, ela sempre terá um lugar guardado em meu coração.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com esta trajetória, meu muito obrigado. Esse capítulo se encerra, mas levo comigo tudo que aprendi para os desafios que virão.

RESUMO

O crescimento exponencial da energia solar no Brasil traz não só promessas de um futuro sustentável, mas também um novo desafio: o descarte de milhões de toneladas de módulos fotovoltaicos nos próximos anos. Para evitar que essa revolução energética se transforme em um problema ambiental, soluções inovadoras ganham protagonismo. Reciclagem, reuso e logística reversa surgem como pilares de uma economia circular capaz de gerar empregos, preservar recursos e reduzir impactos ecológicos. Com base em experiências internacionais e adaptações realistas ao cenário brasileiro, são exploradas estratégias que combinam tecnologia, políticas públicas e conscientização. Um olhar essencial sobre o lado oculto da energia limpa — e sobre como transformá-lo em oportunidade.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos, Logística reversa, Reciclagem, Economia circular, Ciclo de vida.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ACV: Avaliação do Ciclo de Vida

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

EVA: Acetato-vinilo de etileno

GC: Geração Centralizada

GD: Geração Distribuída

IRENA: Agência Internacional de Energia Renovável

ONU: Organização das Nações Unidas

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPP: Parceria Público-Privada

REP: Responsabilidade Estendida ao Produtor

SoG-Si: Silício de Grau Solar

EPRI: Electric Power Research Institute

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUDENE: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

PV: Photovoltaic (Fotovoltaico)

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

GDP: Gross Domestic Product (Produto Interno Bruto)

EMF: Electric and Magnetic Fields (Campos Elétricos e Magnéticos)

CVM: Comissão de Valores Mobiliários

GD1: Geração Distribuída 1

GD2: Geração Distribuída 2

Fio B: Fio B (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição)

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Conceitos Preliminares	15
2.1. Geração Fotovoltaica no Brasil	15
2.1.1 Evolução do Mercado	15
2.1.2 Impactos Esperados com o Envelhecimento dos Módulos	16
2.2 Geração Distribuída x Geração Centralizada	17
2.2.1 Geração Distribuída	17
2.3 Estrutura dos Módulos Fotovoltaicos	19
2.3.1 Composição dos Módulos	19
2.3.2 Desafios na Reciclagem de Cada Componente	21
2.4. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	21
2.4.1 Importância da ACV na Análise de Impactos	21
2.4.2 Principais Fases Críticas	22
2.5. Logística Reversa e Gestão de Resíduos	22
2.5.1 Conceito e Aplicação no Brasil	22
2.6 Desafios da Implementação no Brasil	23
3. Revisão bibliográfica	25
4. Enunciado do Problema	27
5. Metodologia	28
5.1 Análise Documental	28
5.2 Estudo de Caso: Aplicação das Práticas Chinesas no Brasil	29
5.3 Estimativa de Resíduos Fotovoltaicos no Brasil	29
5.4 Proposição de Ações	29
6. Ciclo de Vida de um Painel Fotovoltaico	30
6.1.1 Fabricação	30
6.1.2 Transporte	31
6.1.3 Instalação e Uso	31

6.1.4 Fim de Vida e Descarte	32
6.2 Reciclagem de painéis Fotovoltaicos	32
6.2.1 Desmantelamento	32
6.2.2 Tratamento Térmico	33
6.2.3 Tratamento Químico	33
6.2.4 Reciclagem Mecânica	33
6.2.5 Recuperação do Silício	33
6.2.6 Recuperação de Metais Preciosos	35
6.2.7 Reciclagem Térmica Avançada e Pirolização	35
6.3 Aplicação no Brasil através da Logística Reversa, Reciclagem, Reuso e Recuperação de Módulos	35
6.3.1. Desenvolvimento de Infraestrutura de Logística Reversa	35
6.3.1.1 Coleta e Transporte	35
6.3.1.2 Regulação e Incentivos	36
6.3.2. Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos	36
6.3.3. Reuso de Módulos Fotovoltaicos	37
6.3.4. Recuperação de Módulos Fotovoltaicos	37
7. Caso chinês	38
7.1. Introdução	38
7.2 Gestão de Resíduos Fotovoltaicos na China	39
7.3 Contexto Brasileiro	41
7.4 Propostas de Ações para o Brasil	42
7.4.1 Criação de um Marco Regulatório Nacional	42
7.4.2 Incentivo à Logística Reversa	42
7.4.3 Parcerias Público-Privadas e Fomento à Inovação Tecnológica	43
7.4.4 Criação de Centros de Reciclagem Regionais	43
7.4.5 Sensibilização e Educação Ambiental	44
7.5 Considerações Finais	44

8. Conclusões e Perspectivas	45
8.1 Perspectivas Futuras	47
Referências	48

1. Introdução

O grande aumento da adoção de tecnologias avançadas e fontes de energia renováveis têm gerado uma grande transformação na matriz energética tanto global quanto brasileira. Dentre essas tecnologias, estão presentes os módulos fotovoltaicos que desempenham um papel fundamental, tanto para transicionar para uma economia de baixa emissão de carbono, como também na publicidade positiva da sustentabilidade energética. Porém, o envelhecimento desses painéis e consequentemente o gerenciamento de seus resíduos apresentam diversos desafios ambientais e logísticos que demandam uma urgente cautela. Estima-se que, até 2050, 120 milhões de toneladas anuais de resíduos eletrônicos no volume global sejam alcançadas, dentre essas, uma parcela expressiva proveniente de módulos fotovoltaicos e outros componentes eletrônicos (ONU, 2019), sendo 4% a 14% de resíduos de equipamentos fotovoltaicos (IRENA, 2016). Esse contexto ressalta a importância de gerar e produzir estratégias efetivas para diminuir os grandes impactos ambientais associados ao fim da vida útil desses módulos.

Os painéis fotovoltaicos, que são o pilar da produção de energia solar no Brasil e no mundo, têm uma vida útil que varia entre 25 e 30 anos, que é uma longa vida útil. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2024), o Brasil já possui uma capacidade instalada de 50 GW em energia solar e tem projeções de crescimento contínuo nos próximos anos. Esse substancial crescimento da adoção de energia solar significa que, num futuro próximo, uma enorme quantidade de módulos fotovoltaicos atingirá o fim de sua vida útil, ou seja haverá um volume considerável de resíduos que precisará ser gerenciado de forma sustentável e eficiente. Essa necessidade de uma gestão eficaz dos resíduos torna-se ainda mais urgente tendo em mente que, segundo o plano nacional de energia (PNE 2050) o Brasil pode alcançar 307 GW em 2050, tomando como base um valor médio aproximado de 60 kg/kWh, basta fazer $307.000.000/60 = 18,42$ milhões de toneladas de equipamento fotovoltaico, mas deve se ter em mente que isso ainda não é os resíduos, pois a maior parte ainda

estará ativo, supõe-se que 29% disso realmente seja descarte, o que equivale a aproximadamente 5,32 milhões de toneladas de resíduos.

A logística reversa manifesta-se como uma solução estratégica para debater essa questão. Ela se refere ao procedimento da reiteration dos produtos ao ciclo produtivo após o fim da vida útil do material, possibilitando a recuperação de materiais valiosos e com isso a atenuação do volume de rejeitos que precisam de descarte final. No cenário dos módulos fotovoltaicos, a logística reversa inclui o recolhimento dos painéis no final da sua vida útil, sua qualificação e o encaminhamento para processos de reciclagem ou reuso, quando viável. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), a aplicação de certas condutas de logística reversa têm o potencial de diminuir em cerca de até 70% o volume de resíduos eletrônicos que geralmente são destinados aos aterros sanitários, possibilitando assim uma economia mais circular e sustentável. Além disso, a restituição desses materiais no ciclo de produção auxilia a preservação dos recursos naturais e a redução da pegada ecológica relacionada à confecção de novos módulos.

A reciclagem dos painéis fotovoltaicos é de extrema importância na atenuação dos impactos ambientais. Os módulos têm em sua composição alguns materiais que têm um grande valor comercial, como silício, cobre, prata, alumínio e, que têm a possibilidade de serem resgatados e reutilizados em novos produtos. Segundo dados da IRENA (2016), as tecnologias de reciclagem que estão disponíveis na atualidade possibilitam a recuperação de até 95% dos materiais que foram utilizados para produzir um módulo fotovoltaico. Contudo, o resultado positivo de uma eventual reciclagem deriva de diversos fatores, bem como a uniformização dos módulos para facilitar o desmonte e a partição das partes, da mesma maneira que a criação de incentivos econômicos que possibilitem a reciclagem ser uma opção exequível e atrativa para as empresas. A gestão de resíduos fotovoltaicos exige políticas públicas eficazes, com incentivos fiscais e apoio financeiro. Um exemplo disto é a atuação da Sudene, que por meio do Fundo de Desenvolvimento do Nordeste (FDNE) e da redução de até 75% no Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ), viabilizou a instalação da fábrica da Fiat (hoje Stellantis) em Goiana-PE, com R\$ 1,9 bilhão em financiamento (SUDENE, 2013). A iniciativa gerou

empregos e desenvolvimento, mostrando como políticas bem estruturadas podem impulsionar setores como o da reciclagem de painéis solares. Subsídios ou créditos de carbono podem executar também uma parte de suma importância na propaganda da reciclagem de painéis fotovoltaicos, e ao mesmo tempo promovem a inovação tecnológica no setor.

A reciclagem não é a única prática que oferece benefícios ambientais e econômicos significativos, o reuso e a recuperação também têm um papel importante nessa questão. O reuso, por exemplo, realiza a reutilização dos painéis em novas aplicações, possibilitando seu uso em sistemas de armazenamento de energia em áreas rurais que não têm acesso a energia elétrica ou em diversos outros projetos de menor escala, onde a “alta” eficiência energética não é tão importante quanto em usinas ou fazendas solares. A recuperação, no que lhe diz respeito, é capaz de abranger a substituição de peças defeituosas ou degradadas para prolongar a vida útil dos módulos. Alguns estudos demonstram que, com manutenção e recuperação adequadas, como por exemplo de acordo com Costa, Hirashima e Ferreira (2021) Inspeções Técnicas Detalhadas ajudam a identificar e corrigir problemas, como conexões soltas ou partidas, pontos quentes e quaisquer falhas nos inversores o que evita grandes danos e garante uma melhor performance bem como limpezas periódicas nos módulos fotovoltaicos aumentam a vida útil dos painéis. Isso possibilita uma opção viável para lugares remotos ou para projetos com orçamentos limitados, bem como traz a redução da demanda de fabricação de novos módulos, economizando assim valiosos recursos naturais e também energia.

Para que sejam viáveis, essas práticas demandam um âmbito normativo e econômico favorável. O desenvolvimento de um marco regulatório que imponha aos fabricantes o desenvolvimento de programas de logística reversa e reciclagem dos painéis que produzem, análogo ao existente para diversos outros produtos eletrônicos em várias jurisdições, é imprescindível. No mais, o trabalho em equipe entre o setor público e privado pode desencadear a evolução de uma base para o tratamento dos módulos descartados. Parcerias público-privadas (PPPs) precisam ser acordadas para que possam ser criados centros de reciclagem e recuperação em regiões estratégicas, facilitando assim a coleta e o tratamento dos módulos em fim de vida útil.

Ainda é importante salientar que, a politização do consumidor sobre a grande importância da devolução dos módulos no fim de sua vida útil é crucial. Campanhas de conscientização ambiental, juntamente a programas de responsabilidade estendida ao produtor (REP), podem fomentar os compradores a ter uma participação ativa no ciclo de reciclagem e reuso. A REP, obriga os fabricantes a terem responsabilidade pelo ciclo completo de vida de seus produtos, é um instrumento poderoso para garantir que os painéis tenham tratamento adequado após o uso.

Este trabalho tem como objetivo explorar e propor ações para mitigar o impacto ambiental com o envelhecimento de módulos, com propostas de ações para viabilizar empresas de logística reversa e reciclagem, reuso e recuperação de módulos. A análise incorpora as melhores práticas adotadas em países que já estão relativamente avançados na gestão de resíduos eletrônicos e fotovoltaicos, assim como as novas tecnologias que estão surgindo que podem ser aplicadas no Brasil. O estudo visa contribuir para a criação de uma referência sustentável que diminua substancialmente os impactos ambientais e ainda promova uma economia circular e responsável, alinhada aos desafios do século XXI.

2. Conceitos Preliminares

2.1. Geração Fotovoltaica no Brasil

2.1.1 Evolução do Mercado

A utilização de energia solar fotovoltaica tem experienciado um rápido crescimento no Brasil, devido a combinação de alguns fatores como a grande quantidade de irradiação solar, alguns incentivos governamentais, e o aumento da necessidade por fontes de energia renovável, e uma grande destaque para a queda brusca de preços em equipamentos fotovoltaicos na última década. A Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, homologada no ano de 2012, foi um grande marco que trouxe diversos avanços para a energia solar, pois possibilitou a geração distribuída de energia, permitindo a integração de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica nacional. Essa regulamentação foi um divisor de águas, pois a partir de então, os consumidores poderiam gerar sua própria energia e injetar o excedente na rede,

gerando créditos que duram até 5 anos (60 meses) e que poderão ser abatidos na conta de luz pagando apenas a taxa mínima de consumo da concessionária.

Com a mudança no enquadramento dos sistemas solares, agora existe a distinção de classificação **GD1** e **GD2** no contexto da geração distribuída, que se refere ao enquadramento tarifário em relação ao pagamento do **Fio B**:

- **GD1:** São sistemas de geração distribuída que foram conectados à rede até 6 de janeiro de 2023. Esses sistemas solares conseguiram obter o "direito adquirido", ou seja, significa que eles continuam a operar sob as regras anteriores (**Resolução Normativa nº 482 da ANEEL**), sem ter a obrigação de pagar o imposto pelo uso da rede de distribuição (Fio B) até 2045. Essa condição proporciona uma vantagem expressiva para os sistemas de GD1, que por sua vez mantêm os benefícios econômicos da geração distribuída integralmente para os consumidores que aderiram antes dessa data limite.
- **GD2:** São os sistemas de geração distribuída que foram ou serão conectados à rede a partir de 7 de janeiro de 2023. Esses sistemas solares não possuem o "direito adquirido" e portanto são obrigados ao pagamento progressivo da tarifa pelo uso da rede de distribuição (Fio B), ele será implementado de forma progressiva até 2029. Desde então, os consumidores GD2 pagam uma tarifa parcial pelo uso da rede, que será proporcional à energia injetada na rede, ou seja, o consumo direto não é taxado.

Segundo a ABSOLAR, no ano de 2024, o Brasil atingiu em energia solar fotovoltaica uma capacidade instalada de mais de 50 GW, e está crescendo rapidamente. Esse expressivo crescimento põe o Brasil entre os maiores mercados de energia solar do mundo, e há expectativas de ampliação contínua nos próximos anos. A GD apresenta um crescimento mais veloz, e representa 35,6 GW de potência instalada (ANEEL, 2025). Este modelo de geração é mais comum entre pequenas empresas que oferecem desconto na conta de energia e residências, que procuram reduzir seus custos com energia elétrica e almejam sua independência energética.

2.1.2 Impactos Esperados com o Envelhecimento dos Módulos

Com a energia solar no Brasil crescendo cada vez mais rápido, a questão do envelhecimento e descarte dos painéis fotovoltaicos se torna cada vez mais preocupante. Estima-se que, em um horizonte de 20 a 30 anos, haverá uma grande quantidade de módulos que atingirão o fim de sua vida útil, necessitando de descarte ou reciclagem. De acordo com o plano nacional de energia (PNE 2050) o Brasil pode alcançar 307 GW em 2050 o que equivale a aproximadamente 5,32 milhões de toneladas de resíduos, como calculado anteriormente, o que é um número muito preocupante. No Brasil, a falta de uma boa infraestrutura para o manejo desses resíduos caracteriza um grande desafio, ainda mais sobre a questão da capacidade de reciclagem e reuso dos módulos.

Com esse cenário em mente urge-se a implementação de estratégias eficazes para diminuir os impactos ambientais que estão associados ao envelhecimento dos módulos. É necessário, ainda, a criação de políticas públicas que fomentem a reciclagem e a reutilização de módulos, bem como a criação de tecnologias que possibilitem a recuperação eficaz dos materiais, para assim ser possível garantir a sustentabilidade do setor.

2.2 Geração Distribuída x Geração Centralizada

O mercado de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil pode ser dividido em dois principais segmentos: a Geração Distribuída (GD) e a Geração Centralizada (GC). Esses dois modelos representam papéis importantes na matriz elétrica nacional, porém têm características e desafios bem distintos, mais especificamente no que diz respeito à gestão de resíduos e à adesão de práticas de sustentabilidade, como a logística reversa e a reciclagem de módulos fotovoltaicos.

2.2.1 Geração Distribuída

Geração Distribuída é representada por uma produção de energia elétrica em pequena escala, geralmente próxima ao local de consumo (consumo direto ou autoconsumo remoto). Esse tipo de geração começou a ganhar destaque no Brasil com a homologação da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL em 2012, o que permitiu que os consumidores pudessem instalar sistemas fotovoltaicos em suas propriedades e que a energia que não fosse consumida durante o consumo direto, fosse injetada na rede elétrica podendo ser consumida depois através do sistema de

créditos. Esse modelo é um grande sucesso, tendo em vista que houve um grande crescimento da instalação de sistemas fotovoltaicos em residências, pequenos comércios e propriedades rurais.

A GD é a principal força por trás do crescimento de energia solar fotovoltaica no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 70% da capacidade instalada (ABSOLAR, 2025). Um grande benefício da Geração Distribuída é que a energia é gerada e consumida localmente, ou seja, há uma grande redução das perdas que ocorrem durante a transmissão da energia em distâncias mais longas. Ainda é possível ressaltar que a GD dá mais liberdade para os consumidores, que podem se proteger das flutuações tarifárias reduzindo os impactos, como bandeiras amarelas e vermelhas e de eventuais falhas no fornecimento de energia (para aqueles que usam sistemas isolados da rede elétrica).

No entanto, a Geração Distribuída também possui certos desafios significativos, principalmente em termos da gestão dos módulos ao final de sua vida útil. A grande variedade de localizações geográficas desses sistemas faz com que a coleta e o tratamento dos resíduos se tornem mais complexos, o que exige uma rede logística bem estruturada para a implementação da logística reversa. Para que seja possível minimizar o impacto ambiental da GD é fundamental que haja a conscientização dos consumidores e a criação de incentivos para o descarte adequado.

2.2.2 Geração Centralizada

É dito que a Geração Centralizada é a produção de energia, em usinas solares de grande porte, geralmente localizadas em áreas mais afastadas dos centros urbanos. Este modo de geração tende a seguir a tradição de outras das grandes instalações energéticas, como hidrelétricas e termelétricas, que são em grande escala, uma localização remota, transmissão em longa distância e uma gestão centralizada, e, ainda, tem a responsabilidade de ser cerca de 30% da capacidade instalada de energia solar no Brasil (ABSOLAR, 2025).

Esse modelo de geração é mais usado para atender à demanda de grandes consumidores ou ainda para injeção na rede elétrica nacional, tendo em vista que as usinas de Geração Centralizada têm capacidade de gerar grandes quantidades de

energia, que são então transmitidas por longas distâncias até os centros de consumo. Devido ao seu tamanho, a GC com certeza pode se beneficiar de economias de escala, tanto em sua produção de energia quanto na questão de gerir resíduos dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil.

Um dos grandes desafios da Geração Centralizada é que ela tem necessidade de extensas linhas de transmissão, ou seja, tem grande chance de causar impactos ambientais significativos como o desmatamento de uma grande área para a construção, fora que há perdas de energia durante o transporte. Porém, ocorre uma grande concentração geográfica dos módulos, o que por sua vez facilita a implementação de sistemas de logística reversa e reciclagem, tendo em vista que grandes volumes de resíduos podem ser geridos de forma centralizada, o que torna o processo muito mais eficiente e economicamente viável .

2.3 Estrutura dos Módulos Fotovoltaicos

2.3.1 Composição dos Módulos

Os módulos fotovoltaicos têm presente em sua composição vários materiais que possuem papéis críticos na conversão da energia solar em eletricidade. Em um módulo fotovoltaico típico sua estrutura inclui:

1. **Células Fotovoltaicas:** Segundo Souza, Ferreira e Mendes (2022) As células fotovoltaicas são o componente central dos módulos solares, responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade. A maioria dos módulos utilizados comercialmente contém células de silício, que podem ser de silício monocristalino ou policristalino. O silício é processado para criar "wafers" que formam essas células. As células monocristalinas são mais eficientes, embora o custo de produção seja maior. Além disso, as células fotovoltaicas possuem em sua composição os eletrodos que são formados por prata ou alumínio.
2. **Vidro Fotovoltaico:** Uma camada de vidro temperado é usada na parte frontal ou na traseira, quando bifacial, do módulo para proteger as células solares de danos físicos, como impactos e poeira. Este vidro é frequentemente tratado com revestimentos antirreflexo, otimizando a

absorção da luz solar e, portanto, aumentando a eficiência do módulo. (SOUZA; FERREIRA; MENDES, 2022)

3. **Encapsulante (EVA):** O acetato de vinil-etileno (EVA) é amplamente utilizado para encapsular as células fotovoltaicas, fornecendo uma barreira contra a umidade e a radiação ultravioleta. O EVA também ajuda a unir as diferentes camadas do módulo, proporcionando resistência mecânica (SOUZA; FERREIRA; MENDES, 2022).
4. **Backsheet:** O backsheet, localizado na parte traseira do módulo, é geralmente feito de polímero TEDLAR em módulos antigos (BUERHOP-LUTZ; STROYUK; PICKEL; WINKLER; HAUCH; PETERS, 2021) e vidro fotovoltaico em módulos modernos (KRAEMER; WIESE, 2015) e tem a função de proteger as células solares e componentes internos contra umidade e outros agentes externos. Ele também oferece isolamento elétrico, prevenindo falhas nos módulos (SOUZA; FERREIRA; MENDES, 2022).
5. **Moldura de Alumínio:** A moldura de alumínio que envolve o módulo serve como um suporte estrutural e facilita a instalação em sistemas de fixação. Ela também protege as bordas de vidro durante o manuseio e a instalação (SOUZA; FERREIRA; MENDES, 2022).
6. **Caixa de Junção:** A caixa de junção abriga as conexões elétricas que integram o módulo ao sistema fotovoltaico. Ela é selada para proteger os componentes elétricos contra umidade e corrosão (SOUZA; FERREIRA; MENDES, 2022). Além disso, os cabos condutores, que interligam os módulos e conduzem a energia gerada até o inversor, desempenham um papel essencial no desempenho e na segurança do sistema. Esses cabos devem ser adequados às condições ambientais, com isolamento resistente à radiação UV, variações de temperatura e umidade, conforme orienta o Instituto de Engenharia em suas diretrizes para instalações fotovoltaicas (INSTITUTO DE ENGENHARIA, 2019).

2.3.2 Desafios na Reciclagem de Cada Componente

Um módulo fotovoltaico apresenta uma grande diversidade de materiais, o que gera desafios significativos para a reciclagem. Cada tipo de material solicita um processo muito específico para ser reciclado de uma forma eficiente:

1. **Células de Silício:** Para realizar o processo de reciclagem de células de silício é preciso a separação e purificação do silício. Este é um processo que pode ser complexo e oneroso, porém é fundamental para que se possa recuperar este material tão valioso para a produção de novos módulos (RAMOS, 2022).
2. **Vidro:** O vidro fotovoltaico pode ser reciclado de maneira semelhante ao vidro comum, porém existe a presença de revestimentos antirreflexo e há, ainda, a necessidade de separar o vidro do encapsulante e das células solares tornam o processo ainda mais complicado (RAMOS, 2022).
3. **Encapsulante (EVA) e backsheet:** Esses polímeros são mais difíceis de reciclar devido à sua composição química. A degradação térmica é uma das poucas opções disponíveis, mas pode não ser economicamente viável (RAMOS, 2022).
4. **Moldura de alumínio:** O alumínio é um material amplamente reciclado em outras indústrias, e o processo de reciclagem de molduras de alumínio é relativamente simples. O alumínio pode ser derretido e utilizado sem perda significativa de propriedades (RAMOS, 2022).

2.4. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

2.4.1 Importância da ACV na Análise de Impactos

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de extrema importância para que se possa analisar os possíveis impactos ambientais que estão associados aos módulos fotovoltaicos durante o seu longo ciclo de vida. A ACV avalia todas as etapas, desde o começo na extração das matérias-primas, analisa também a fabricação, o transporte, seu uso e, por fim, o seu descarte ou a

reciclagem dos módulos. Esse método possibilita determinar as fases com maior significância em termos de impacto ambiental, o que fornece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de mitigação (Fthenakis et al., 2008; IRENA, 2016).

Na produção de componentes eletrônicos, o setor manufatureiro é muito importante no consumo de energia e nas emissões de carbono, especialmente na produção de silício em (SoG-Si). Segundo pesquisas (Fthenakis et al., 2008), a produção de silício monocristalino pode representar até 30% do impacto ambiental total do setor fotovoltaico. Além disso, o descarte ou a reciclagem podem ter um impacto significativo no meio ambiente, especialmente se as peças não forem recicladas adequadamente (IRENA, 2016).

2.4.2 Principais Fases Críticas

As fases críticas identificadas pela ACV incluem:

- **Manufatura:** inclui extração e processamento de matérias-primas, fabricação de células fotovoltaicas, montagem de componentes e transporte. Este setor é responsável por uma grande proporção das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de energia (SANTOS, 2022).
- **Aplicação:** O silício cristalino apresenta uma degradação anual média entre 0,5% e 0,6% (SOUZA; PEREIRA; FERREIRA, 2022).
- **Descarte ou Reciclagem:** O fim da vida útil dos componentes é um processo muito importante. Uma boa reciclagem pode reduzir o impacto ambiental, mas se as peças forem enviadas para aterros liberam materiais tóxicos como chumbo, em baixas quantidades presentes na liga, e cádmio proveniente de módulos de tecnologia de CdTe (SOUZA; PEREIRA; FERREIRA, 2022).

2.5. Logística Reversa e Gestão de Resíduos

2.5.1 Conceito e Aplicação no Brasil

A logística reversa é uma prática que vem se tornando cada vez mais relevante em diversos setores, incluindo fotovoltaico, à medida que cresce o interesse pela sustentabilidade e responsabilidade ambiental. No Brasil, a Política

Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece a logística reversa como uma ferramenta essencial para a gestão de resíduos sólidos, incluindo os eletrônicos e a energia solar.

A aplicação da logística reversa no setor fotovoltaico brasileiro continua a enfrentar desafios significativos. A infraestrutura para coleta, transporte e reciclagem de módulos solares é limitada e os custos associados a esses processos são frequentemente altos. A falta de uma rede robusta de instalações de reciclagem especializadas dificulta a implementação efetiva da logística reversa, resultando em módulos sendo descartados indevidamente em aterros sanitários, agravando os impactos ambientais (Oliveira, 2021).

2.6 Desafios da Implementação no Brasil

Primeiramente é válido pontuar que um dos principais desafios para a efetiva implementação da logística reversa no Brasil é a falta de incentivos econômicos (SOUSA; OLIVEIRA; CUNHA, 2023). Além disso, a complexidade logística e a falta de conhecimento técnico específico sobre a reciclagem de módulos solares também são grandes barreiras (PREET; SMITH, 2020). Para superar esses grandes desafios, é necessário desenvolver Políticas públicas que prevejam incentivos fiscais, subsídios e assistência técnica às empresas. (SOUSA et al., 2023).

Segundamente, é importante notar que existe, ainda, uma deficiência na infraestrutura de reciclagem. No Brasil, há poucas plantas especializadas na reciclagem de peças fotovoltaicas, o que causa um alto custo logístico para o descarte correto desses materiais (Ferreira, 2023). Além disso, uma grande parte dos materiais que estão presentes nos módulos fotovoltaicos, como EVA e o backsheet, têm uma composição química complexa, o que dificulta a reciclagem eficiente (SOUZA; PEREIRA; FERREIRA, 2022).

Outro grande desafio é a questão da Legislação. É imprescindível perceber que existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que obriga a aplicação de uma logística reversa dos resíduos em âmbito nacional, porém há brechas na legislação para o setor fotovoltaico, como por exemplo a Ausência de regulamentação específica para painéis fotovoltaicos, falta de normas técnicas sobre

reciclagem, inexistência de um sistema de rastreio e controle. A dificuldade para adoção de boas práticas ambientais por parte das empresas é justamente pela falta de normas específicas para o descarte e reciclagem de painéis fotovoltaicos (SOUSA et al., 2023).

Faz-se necessário pontuar que existe a questão da conscientização do setor sobre a necessidade de reciclagem é praticamente nula. Muitos instaladores, integradores ou até comercializadoras de energia ou geradoras não possuem informações adequadas sobre como gerenciar de forma sustentável os resíduos produzidos por equipamentos fotovoltaicos (OLIVEIRA, 2023). No Brasil, a ausência de políticas públicas e regulamentações voltadas à gestão dos resíduos fotovoltaicos dificulta a estruturação de cadeias de reciclagem, resultando em uma destinação incerta para a maioria dos painéis ao final de sua vida útil (SOUSA et al., 2023).

Por fim, existe o problema do elevado custo de reciclagem. Hoje, a reciclagem de módulos fotovoltaicos necessita de subsídios governamentais para ser economicamente atrativo para as empresas (OTTONELLI, 2021). A recuperação de preciosos materiais como silício e prata necessitam de processos extremamente sofisticados que têm um custo elevado e não possuem escala suficiente para reduzir seus custos para implementação (RAMOS, 2022). Nesse contexto, Liu et al. (2020) apontam que, mesmo com a venda dos materiais reciclados, a reciclagem de módulos fotovoltaicos gera apenas um pequeno retorno financeiro — cerca de US\$ 0,57 de lucro por quilowatt reciclado, devido aos altos custos envolvidos (US\$ 25,11 por kW). Isso demonstra que, economicamente, o processo ainda é pouco viável, sendo necessário o apoio de políticas públicas ou o avanço de tecnologias mais eficientes para que se torne competitivo.

A Logística reversa e a Gestão de resíduos no Brasil têm vários desafios que precisam ser solucionados num futuro próximo, nessa ótica, faz sentido trazer como primeira solução o investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem. A aplicação de processos químicos inovadores pode aumentar a eficiência de reciclagem e painéis fotovoltaicos, o que reduziria os custos e minimizaria de forma significativa os impactos ambientais como por exemplo o estudo brasileiro publicado na *pV magazine Brasil* (2023) onde foi utilizado água em estado supercrítico na reciclagem de painéis fotovoltaicos que permitiu uma

degradação orgânica de 99,6% sem uso de produtos químicos tóxicos, além de recuperar metais como alumínio, o magnésio, o cobre e a prata com eficiência de 76% (PEREIRA et al., 2023). Nesse sentido, é lógico perceber que é necessário a criação de uma cadeia de logística reversa eficiente, que será firmada pela aliança e parceria entre setor público e privado (KHAWAJA; GHATH; ALKHALIDI, 2021), que vai contribuir para a melhoria do gerenciamento desses resíduos no Brasil.

É fundamental que exista uma colaboração entre universidades, centros de pesquisas e indústrias, assim criando inovações no setor. A criação de materiais alternativos e processos mais sustentáveis pode reduzir o impacto ambiental gerado pela cadeia de produção da energia solar (SOUSA et al., 2023), garantindo assim um ciclo de vida mais eficiente dos painéis fotovoltaicos.

Em conclusão, investimentos em infraestrutura, conscientização do setor e criação de políticas integradas são os ingredientes necessários para solidificação da logística reversa de módulos fotovoltaicos no Brasil. Apenas através dessas iniciativas será crível obter um descarte ambientalmente adequado e viabilizar a economia circular no setor de energia solar no Brasil.

3. Revisão bibliográfica

O avanço da energia solar fotovoltaica tem gerado discussões acadêmicas não apenas sobre sua eficiência energética, mas também sobre os impactos ambientais causados pela fabricação, uso e descarte dos módulos. A literatura científica tem ampliado o debate em torno da sustentabilidade do setor, apontando desafios econômicos, regulatórios e tecnológicos que envolvem o fim da vida útil dos sistemas fotovoltaicos.

Fthenakis et al. (2008) destacam que, embora os módulos solares sejam amplamente reconhecidos como fontes de energia limpa, a produção de silício monocristalino, material base para a maioria dos módulos, representa cerca de 30% do impacto ambiental total ao longo de seu ciclo de vida. Esse dado revela que a sustentabilidade do setor não pode ser avaliada apenas pela operação dos sistemas, mas deve considerar toda a cadeia produtiva, especialmente a fase de descarte.

O relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2016) estimou que, até 2050, o volume global de resíduos de painéis fotovoltaicos poderá ultrapassar 78 milhões de toneladas. Em países como o Brasil, onde o crescimento da geração distribuída é acelerado, esse cenário levanta preocupações adicionais, sobretudo diante da ausência de uma infraestrutura robusta para a destinação adequada desses resíduos. A literatura aponta que, sem políticas públicas específicas e tecnologias acessíveis, grande parte dos módulos desativados tende a ser descartada incorretamente em aterros sanitários, ampliando os riscos ambientais (SOUZA, 2021; OLIVEIRA, 2023).

No que diz respeito à viabilidade econômica da reciclagem, Liu et al. (2020) realizaram uma análise de custo-benefício na China, revelando que a reciclagem de módulos solares resulta em um lucro médio de apenas US\$ 0,57 por quilowatt reciclado, diante de um custo de aproximadamente US\$ 25,11 por kW. Essa margem estreita evidencia que, na ausência de incentivos fiscais ou políticas de compensação, o processo ainda é pouco atrativo financeiramente para empresas do setor.

Além das barreiras econômicas, os desafios técnicos também são amplamente discutidos. Ramos (2022) observa que a recuperação de materiais nobres como silício e prata requer processos de alta complexidade tecnológica e elevado custo operacional, o que dificulta a escalabilidade da reciclagem. Encapsulantes como o EVA e backsheets à base de polímeros, por sua vez, apresentam resistência à separação e à degradação, sendo considerados de difícil reaproveitamento, conforme reforçado por Preet e Smith (2020).

Diante desse panorama, a inovação tecnológica surge como fator essencial para viabilizar soluções mais eficazes. Um exemplo promissor é o estudo conduzido por Pereira et al. (2023), que investigou a aplicação de água em estado supercrítico na reciclagem de módulos fotovoltaicos. A técnica permitiu uma degradação orgânica de 99,6% sem o uso de produtos químicos tóxicos, além da recuperação de metais como alumínio, magnésio, cobre e prata com eficiência média de 76%. O processo também demonstrou potencial para escalonamento industrial com menor consumo energético, representando um avanço em termos de sustentabilidade operacional.

A literatura internacional também tem discutido modelos de gestão baseados na responsabilidade estendida do produtor (REP), com destaque para experiências da União Europeia, onde fabricantes e importadores são legalmente obrigados a financiar e operacionalizar sistemas de logística reversa para equipamentos fotovoltaicos (ZHANG et al., 2020). No Brasil, entretanto, a ausência de uma regulamentação específica para o setor ainda constitui uma lacuna, dificultando a articulação entre os agentes públicos e privados (SOUSA et al., 2023).

Em meio a essas discussões, nota-se um consenso entre os pesquisadores quanto à necessidade de fortalecer a articulação entre legislação ambiental, desenvolvimento tecnológico e viabilidade econômica, para que a gestão de resíduos fotovoltaicos possa avançar em direção a um modelo circular, sustentável e eficiente. A revisão da literatura evidencia que a solução para os desafios do setor fotovoltaico depende de uma atuação conjunta entre governo, indústria e centros de pesquisa, com investimentos em inovação e políticas públicas eficazes.

4. Enunciado do Problema

O crescimento acelerado da energia solar fotovoltaica no Brasil, especialmente por meio da geração distribuída, tem promovido avanços significativos na diversificação da matriz elétrica e na redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, esse desenvolvimento traz consigo desafios estruturais que ainda não foram plenamente enfrentados, particularmente no que se refere à sustentabilidade no fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos.

Estima-se que, nas próximas décadas, milhões de painéis solares instalados atualmente alcançarão o fim de sua vida útil, resultando em uma quantidade significativa de resíduos. Esse cenário torna urgente o desenvolvimento de estratégias eficazes para o descarte, reaproveitamento e reciclagem desses equipamentos. No entanto, a realidade brasileira é marcada pela ausência de uma infraestrutura adequada para a gestão desses resíduos, pela falta de regulamentação específica para o setor fotovoltaico e pelos altos custos dos processos de reciclagem disponíveis atualmente.

Diante desse contexto, surge a seguinte questão central de pesquisa:
Como mitigar os impactos ambientais decorrentes do envelhecimento dos módulos

fotovoltaicos, considerando a falta de infraestrutura adequada para a gestão de resíduos e os altos custos dos processos de reciclagem no Brasil?

A formulação dessa pergunta busca orientar a reflexão e análise ao longo deste trabalho, direcionando o estudo para propostas que considerem não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também as dimensões legais, sociais e ambientais envolvidas na construção de um modelo sustentável para o setor fotovoltaico brasileiro.

5. Metodologia

A abordagem adotada segue uma linha qualitativa e exploratória, com foco na compreensão dos impactos ambientais associados ao envelhecimento dos módulos solares no Brasil e na proposição de medidas para mitigá-los. A investigação concentra-se nas possibilidades de logística reversa, reciclagem, reuso e recuperação de materiais provenientes de módulos fotovoltaicos, considerando as limitações regulatórias, tecnológicas e econômicas.

A estrutura metodológica contempla três frentes principais: análise documental, estudo de caso comparativo e projeção de cenários de geração de resíduos, com base em dados setoriais e estimativas internacionais. As fontes utilizadas incluem relatórios institucionais, legislações, publicações acadêmicas e dados técnicos de órgãos reguladores e entidades setoriais.

5.1 Análise Documental

Foram examinados documentos normativos e técnicos emitidos por instituições nacionais e internacionais, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a International Renewable Energy Agency (IRENA) e o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Essas fontes forneceram insumos para compreender os marcos regulatórios vigentes, os desafios operacionais e as diretrizes internacionais para a gestão de resíduos fotovoltaicos.

A análise também incluiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), com foco na identificação de lacunas jurídicas relacionadas à inclusão específica de módulos fotovoltaicos no escopo da legislação. A reflexão normativa

foi fundamentada na teoria da norma jurídica de Hans Kelsen, que ressalta a importância da existência formal da lei como condição para sua eficácia social.

5.2 Estudo de Caso: Aplicação das Práticas Chinesas no Brasil

Com base na literatura, desenvolveu-se um estudo de caso comparando as práticas de reciclagem de módulos solares no Brasil e na China. A China foi escolhida como referência devido ao seu papel de liderança na produção de energia solar e às políticas avançadas de economia circular adotadas pelo governo. Estudos de Bleischwitz et al. (2022) e (WANG, 2024) apontam que a estrutura chinesa de reciclagem e logística reversa pode servir como modelo para o Brasil. O estudo de Sousa et. al (2023) complementa essa análise, evidenciando os desafios específicos enfrentados no país e propondo estratégias adaptadas ao cenário brasileiro.

5.3 Estimativa de Resíduos Fotovoltaicos no Brasil

A metodologia também incluiu a análise de dados sobre a geração futura de resíduos fotovoltaicos no Brasil, com base em projeções da IRENA (2016, 2021) e nos estudos de Sousa (2023), para estimar o número de módulos que chegarão ao fim da sua vida útil nas próximas décadas. Além disso, os estudos de Oliveira et al. (2023) reforçam a importância de ter uma infraestrutura adequada para poder gerir os resíduos e consideram fatores como taxa de obsolescência e capacidade de reciclagem nacional. Essas informações foram fundamentais para entender a dimensão do problema e a necessidade de uma infraestrutura adequada para gestão dos resíduos.

5.4 Proposição de Ações

Por fim, com base nas evidências analisadas e nos estudos de caso, foram propostas medidas para reduzir o impacto ambiental do envelhecimento dos módulos no Brasil. As propostas incluem a implementação de políticas públicas voltadas para incentivos fiscais, subsídios e assistência técnica às empresas, conforme sugerido por Sousa (2023) e (KHAWAJA; GHATHI; ALKHALIDI, 2021). Além disso, foram recomendadas parcerias público-privadas (PPPs) e desenvolvimento de infraestrutura de logística reversa, inspiradas no modelo discutido por Bleschwitz et al. (2022) e Oliveira (2023).

6. Ciclo de Vida de um Painel Fotovoltaico

O ciclo de vida do painel solar começa com a extração de matérias-primas essenciais, como o silício, o alumínio, o cobre e outros metais raros (PREET; SMITH, 2020). Por exemplo, o silício é um componente central das células fotovoltaicas que é submetido a um processo de refino intensivo para atingir a qualidade necessária para a produção de células solares (PREET; SMITH, 2020). Este processo, conhecido como produção de silício de qualidade solar, é altamente intensivo em termos energéticos e contribui para a pegada de carbono dos painéis (PREET; SMITH, 2020). A extração e o processamento destas matérias-primas têm impactos ambientais significativos, incluindo a degradação do solo, a poluição da água e as emissões de gases com efeito de estufa (ISO 14040, 2006).

6.1.1 Fabricação

Na fase de fabricação, as matérias-primas extraídas passam por processos intensivos que transformam o quartzo em silício de grau solar, o qual é posteriormente refinado para a produção de wafers (FERREIRA NETO et al., 2014). Esse procedimento demanda altas temperaturas e grande consumo energético, contribuindo significativamente para as emissões de CO₂ (PREET; SMITH, 2020). Esse mesmo consumo elevado é observado na produção de células fotovoltaicas, em que o silício policristalino e monocristalino é processado através de técnicas que envolvem dopagem e deposição de camadas anti reflexo, utilizando energia proveniente, em sua maioria, de fontes fósseis (BLUMENSCHNEIN; MILLER, 2016).

A montagem dos módulos, que compreende a laminação das células entre camadas de vidro, encapsulantes, folhas traseiras e a estrutura em alumínio, também demanda um intensivo uso de energia, gerando não só elevadas emissões de CO₂, mas ainda resíduos industriais decorrentes dos processos de corte, limpeza e selagem (PREET; SMITH, 2020). Além do impacto energético, etapas como a limpeza, corte e processamento das células solares exigem grande quantidade de água, o que eleva significativamente o consumo hídrico associado à fabricação dos painéis. Segundo análise do ciclo de vida realizada por Chae et al. (2014), o consumo médio de água para sistemas fotovoltaicos de silício cristalino é de aproximadamente 0,989 m³ por megawatt-hora (MWh) de energia gerada, o que

equivale a cerca de 989 litros por MWh ou 0,989 litro por kWh. Esse volume inclui o uso de água para resfriamento, lavagem e processos químicos durante a purificação do silício e a fabricação das células, evidenciando que a pegada hídrica da energia solar, embora menor do que a de fontes convencionais, ainda representa um fator importante no ciclo produtivo.

Embora esses processos sejam fundamentais para garantir a eficiência e durabilidade dos módulos fotovoltaicos, o intenso uso de energia e água na fabricação contribui para uma significativa pegada de carbono e de recursos hídricos. Estudos indicam que, apesar de a operação dos painéis ter um impacto ambiental quase nulo, a etapa de produção consome uma parcela expressiva de recursos, o que ressalta a importância de desenvolver métodos mais eficientes e menos impactantes para a fabricação desses componentes (PREET; SMITH, 2020).

6.1.2 Transporte

Após a fabricação, os painéis solares serão transportados para local de instalação. Este transporte é realizado em várias fases, desde a fábrica até ao distribuidor, depois até ao cliente final. O transporte de painéis solares implica utilização de veículos de grandes dimensões, o que pode aumentar as emissões de CO₂ associadas ao ciclo de vida dos painéis. O transporte pode contribuir significativamente para a pegada de carbono painéis solares, especialmente se a unidade de produção e local de instalação estiverem localizados em continentes diferentes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

6.1.3 Instalação e Uso

A fase de utilização dos painéis solares destina-se a contribuir para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, gerando eletricidade a partir da luz solar e substituindo a necessidade de fontes de energia fósseis (PREET; SMITH, 2020). O tempo de vida típico de um painel solar é de 25-30 anos, durante os quais funcionam com um impacto ambiental mínimo. O principal benefício ambiental durante a fase de utilização é a produção de energia limpa e renovável em emissões diretas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). No entanto, a eficiência dos painéis pode diminuir ao longo do tempo devido à degradação

material, resultando na redução da produção de eletricidade (BLUMENSCHNEIDER; MILLER, 2016).

6.1.4 Fim de Vida e Descarte

Quando os painéis fotovoltaicos chegarem ao final de vida útil, têm de ser removidos e, idealmente, reciclados, de modo a recuperar os materiais valiosos e a minimizar o seu impacto ambiental (PREET; SMITH, 2020). O descarte inadequado pode levar à liberação de substâncias perigosas e ao desperdício de recursos que poderiam ser reciclados ou reutilizados (BLUMENSCHNEIDER; MILLER, 2016). A vida útil dos painéis Solares é um dos maiores desafios para a sustentabilidade da energia solar. Se os painéis não forem reciclados adequadamente, isso pode levar a um aumento do lixo eletrônico, que já é um problema global (IRENA, 2016). A logística reversa e as infra-estruturas de reciclagem são essenciais para garantir que os painéis solares sejam eliminados de uma forma amigável (IRENA, 2016).

6.2 Reciclagem de painéis Fotovoltaicos

A reciclagem de painéis fotovoltaicos é um processo complexo mas essencial para garantir a sustentabilidade do setor da energia solar (PREET; SMITH, 2020). Com o crescimento acelerado do mercado fotovoltaico e a previsão de geração milhões de toneladas de resíduos de módulos solares nas próximas décadas, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de reciclagem eficazes são uma prioridade (Wang, 2024).

6.2.1 Desmantelamento

O processo de reciclagem dos painéis fotovoltaicos inicia-se com o desmantelamento. Nesta Fase, os painéis são desmontados e a estrutura de alumínio, a caixa de junção e outros componentes são separados (Oliveira, 2021). Este processo pode ser efetuado manualmente ou com recurso de máquinas especializadas (Oliveira, 2021). Desmantelamento crucial porque os metais altamente recicláveis, como alumínio, cobre e prata, podem ser recuperados da estrutura da caixa de junção (EPRI, 2016). Estudos demonstraram que o

desmantelamento manual mais eficiente, causa menos danos maximizando a reciclagem de componentes valiosos.

6.2.2 Tratamento Térmico

Após a desmontagem, o tratamento térmico é utilizado para remover materiais difíceis de separar, tais como encapsulantes (EVA) e backsheet (PREET; SMITH, 2020). Neste Processo, o painel é aquecido para evaporar os materiais orgânicos, deixando os materiais inorgânicos, como o vidro e o silício, para serem recuperados. Este método é eficaz, mas pode produzir gases tóxicos se não for efetuado em instalações adequadas (PREET; SMITH, 2020). São necessárias melhorias técnicas, como utilização de filtros avançados, para minimizar o impacto ambiental deste processo (PREET; SMITH, 2020).

6.2.3 Tratamento Químico

No processamento químico, os materiais orgânicos e inorgânicos são dissolvidos separados com solventes (Oliveira, 2021). Este método é particularmente útil para recuperar silício de alta pureza de células solares e metais preciosos caixas de junção (PREET; SMITH, 2020). O processamento químico pode recuperar certos materiais de forma mais seletiva e eficiente, mas exige uma gestão cuidadosa dos resíduos químicos resultantes, uma vez que a utilização de solventes pode ter impacto ambiental significativo (Oliveira, 2021).

6.2.4 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é uma abordagem que envolve processos físicos, como trituração e moagem, para separar os diferentes componentes do painel. A Reciclagem Mecânica é uma abordagem mais simples e menos dispendiosa, mas a contaminação cruzada entre materiais pode reduzir a eficiência da recuperação de materiais de elevada pureza, como o silício e os metais preciosos (PREET; SMITH, 2020).

6.2.5 Recuperação do Silício

O silício é um dos materiais mais valiosos nos painéis fotovoltaicos, devido à sua função como semicondutor nas células solares. Sua recuperação é uma etapa

fundamental no processo de reciclagem, especialmente quando se busca a reutilização do material em novos módulos. Atualmente, a taxa de recuperação do silício em processos industriais varia entre 80% e 90%, dependendo da tecnologia aplicada e das condições dos módulos fotovoltaicos descartados (Wang, 2024). Esse índice, no entanto, refere-se principalmente ao silício em sua forma bruta, sendo necessária a purificação adicional para que possa ser reutilizado em aplicações fotovoltaicas de alta eficiência.

Os métodos mais comuns para recuperação do silício combinam etapas térmicas, químicas e mecânicas. Após o tratamento térmico que remove os encapsulantes, o silício cristalino é separado do vidro e de outros componentes. Em seguida, são aplicadas soluções químicas, como ácido fluorídrico e hidróxido de sódio, para a limpeza e purificação do material, removendo impurezas metálicas e resíduos orgânicos (Oliveira, 2021). Esse processo permite recuperar o silício com qualidade suficiente para uso em células solares de segunda geração, embora com rendimento energético levemente inferior.

Além dos métodos tradicionais, pesquisas recentes têm explorado abordagens inovadoras para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo. Entre elas estão os processos hidrometalúrgicos aprimorados, que utilizam solventes menos agressivos em sistemas fechados; a biolixiviação, que emprega microrganismos para remover impurezas metálicas; e técnicas emergentes como a separação por ultrassom ou plasma frio, que buscam isolar o silício de forma mais seletiva e com menor dano estrutural (Zhang et al., 2022; Wang, 2024). Em alguns centros de pesquisa, também têm sido testados métodos de condicionamento direto dos wafers de silício, evitando sua completa refundição e reduzindo significativamente o consumo energético da reciclagem.

Essas diferentes abordagens mostram o avanço técnico na recuperação do silício e indicam um movimento crescente em direção a processos mais seletivos, eficientes e ambientalmente seguros, que possam ser integrados às cadeias de logística reversa e reciclagem de painéis solares nos próximos anos.

6.2.6 Recuperação de Metais Preciosos

Os metais preciosos, como a prata e o cobre presentes nas ligações elétricas e nas caixas de junção, podem ser recuperados através de processos como a lixiviação química ou a galvanoplastia (ZHANG et al., 2015). A recuperação de metais preciosos é economicamente viável e pode ajudar a compensar o custo total do processo de reciclagem, mas é necessário um cuidado especial para evitar a poluição ambiental (PREET; SMITH, 2020). Isso inclui o tratamento adequado dos efluentes gerados, já que os reagentes utilizados podem ser tóxicos e contaminantes, exigindo sistemas de contenção, neutralização e descarte controlado para impedir a liberação de substâncias perigosas no solo e na água.

6.2.7 Reciclagem Térmica Avançada e Pirolização

A pirolização é uma tecnologia avançada de reciclagem térmica que decompõe termicamente materiais orgânicos na ausência de oxigênio (PREET; SMITH, 2020). O processo é útil para separar e recuperar materiais orgânicos complexos, como os utilizados em encapsulantes e backsheets (PREET; SMITH, 2020). Embora eficaz na remoção de contaminantes orgânicos e na recuperação de componentes inorgânicos, o elevado custo de instalação e funcionamento das instalações de pirólise limita sua aplicação em grande escala (PREET; SMITH, 2020). A viabilidade econômica do processo depende frequentemente do investimento governamental de incentivos financeiros (ZHANG et al., 2015).

6.3 Aplicação no Brasil através da Logística Reversa, Reciclagem, Reuso e Recuperação de Módulos

Implementar a reciclagem, reuso e recuperação de módulos fotovoltaicos no Brasil exige a criação de uma infraestrutura robusta de logística reversa, combinada com políticas públicas e incentivos que promovam a sustentabilidade no setor de energia solar (SOUSA et al., 2023). A seguir estão os detalhes de como esses processos podem ser estruturados e aplicados no contexto brasileiro.

6.3.1. Desenvolvimento de Infraestrutura de Logística Reversa

6.3.1.1 Coleta e Transporte

A coleta e o transporte de painés solares usados começam com a criação de uma rede de pontos de coleta estrategicamente localizados em áreas com uma elevada concentração de instalações solares. Estes Pontos de coleta podem ser criados em parceria com fabricantes, distribuidores e empresas de energia solar para garantir que os painés sejam transportados para instalações de reciclagem com o menor impacto ambiental possível. A eficiência do transporte e a proximidade dos pontos de coleta são essenciais para minimizar os custos e reduzir as emissões associadas ao transporte de resíduos fotovoltaicos. Isso é destacado por estudos como "Challenges and strategies for managing end-of-life photovoltaic equipment in Brazil: Learning from international experience" e mostram a importância de uma logística bem planejada para atingir esses objetivos (Souza, Figueiredo e Espejo, 2021).

6.3.1.2 Regulação e Incentivos

Além disso, a regulamentação e os incentivos desempenham um papel importante na viabilização da reciclagem dos painés solares. Um Sistema de Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) pode ser introduzido para garantir que os fabricantes assumam responsabilidade por todo o ciclo de vida de seus produtos, incluindo devolução, reciclagem e reutilização dos módulos (IRENA, 2016). Para incentivar esta Responsabilidade, o Governo brasileiro pode conceder incentivos fiscais às empresas que invistam em tecnologias de reciclagem e recuperação de materiais, bem como penalizar empresas que não cumpram as normas ambientais estabelecidas (SOUSA et al., 2023). De acordo com "Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles," a aplicação eficaz das regulações e dos incentivos é imprescindível para que possa ser garantido a participação das empresas e a sustentabilidade econômica das operações de reciclagem (SOUSA 2023).

6.3.2. Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos

A reciclagem de painés fotovoltaicos é um processo essencial para garantir a sustentabilidade do setor da energia solar, especialmente tendo em conta o aumento significativo das instalações de painés fotovoltaicos em todo o mundo (IRENA, 2016). Com a previsão de geração milhões de toneladas de resíduos

fotovoltaicos nas próximas décadas, é essencial que sejam desenvolvidas implementadas tecnologias de reciclagem para lidar com este material em crescimento (Wang, 2024).

6.3.3. Reuso de Módulos Fotovoltaicos

A reutilização dos módulos fotovoltaicos desempenha um papel importante na gestão sustentável destes equipamentos, sobretudo antes de se optar pela reciclagem (IRENA, 2016). É essencial avaliar a possibilidade de recondicionar os módulos que ainda mantêm uma capacidade de produção de energia aceitável (IRENA, 2016). Estes Módulos podem ser reutilizados outras aplicações, como sistemas off-grid ou projetos de pequena escala, prolongando a sua vida útil e reduzindo a quantidade de resíduos gerados (IRENA, 2016). A reutilização é uma alternativa economicamente viável, especialmente quando o custo de um novo módulo é um impasse (SOUSA et al., 2023). Uma avaliação cuidadosa e o recondicionamento podem garantir que esses módulos continuem a contribuir para a geração de energia de forma eficiente e sustentável (IRENA, 2016).

Além disso, a criação de um mercado secundário para módulos reciclados pode incentivar a reutilização a grande escala (IRENA, 2016). Se estes mercados forem corretamente regulamentados, pode garantir-se que os módulos reutilizados cumpram normas mínimas de eficiência e segurança (IRENA, 2016). A viabilidade da reutilização depende de políticas e incentivos claros que apoiem o desenvolvimento destes mercados, o que é essencial para a promoção de uma economia circular no setor fotovoltaico, Oliveira (2021) afirma que para que os mercados secundários funcionem eficazmente e contribuam para sustentabilidade ambiental, é importante estabelecer normas regulamentares e incentivos são importantes de estabelecer porque os mercados secundários funcionem efetivamente contribuam para a sustentabilidade ambiental.

6.3.4. Recuperação de Módulos Fotovoltaicos

No que diz respeito à recuperação de módulos fotovoltaicos, para além da reciclagem de materiais, a recuperação de componentes funcionais, como caixas de junção e molduras de alumínio, pode ser uma estratégia eficaz para acrescentar valor ao processo de reciclagem (EPRI, 2016). Estas peças podem ser reutilizadas

em novos módulos ou vendidas como peças de substituição, reduzindo a necessidade de novos materiais (IRENA, 2016). Oliveira (2021) destaca que a recuperação de componentes inteiros aumenta a eficiência do processo de reciclagem e contribui para a sustentabilidade econômica do setor.

O investimento em pesquisa e desenvolvimento é essencial para melhorar tecnologia de recuperação de módulos fotovoltaicos (PREET; SMITH, 2020). Isto inclui a criação de processos mais eficientes para a separação e refinação de materiais e o desenvolvimento de novas tecnologias que minimizem os resíduos e maximizem a recuperação de recursos (PREET; SMITH, 2020). A colaboração entre universidades, centros de investigação e indústria é fundamental para atingir estes objetivos, e Oliveira (2021) destaca a importância da inovação e da cooperação entre diferentes setores para melhorar a forma como os módulos são recuperados e para garantir que o setor continua a evoluir de forma sustentável.

7. Caso chinês

Caso chinês: Aplicação no Brasil - Gestão de Resíduos Fotovoltaicos Inspirada no Caso da China.

7.1. Introdução

O setor de energia solar no Brasil vive um momento de crescimento constante, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis do país. Com mais de 50 GW de capacidade instalada em 2024 (ABSOLAR, 2024), o número de sistemas fotovoltaicos segue aumentando rapidamente. Esse avanço, no entanto, traz consigo uma preocupação importante: o destino dos módulos ao fim de sua vida útil. Estima-se que, até 2050, cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos serão gerados em todo o mundo, o que reforça a urgência de estratégias voltadas à reciclagem e reutilização desses materiais (PREET; SMITH, 2020).

Sendo um dos maiores produtores de módulos fotovoltaicos, a China enfrenta desafios relacionados com a quantidade crescente de resíduos provenientes de painéis fotovoltaicos em fim de vida. Embora este problema seja global, a China desempenha um papel importante devido à sua enorme capacidade

de produção de módulos fotovoltaicos (PREET; SMITH, 2020). No entanto, o governo chinês adotou políticas robustas para promover a reciclagem e a reutilização de materiais e destaca um estudo sobre soluções futuras para os resíduos fotovoltaicos na China (WANG 2024). O objetivo deste estudo é explorar como o Brasil pode adaptar as melhores práticas China para reduzir o impacto ambiental dos resíduos fotovoltaicos e explorar como elas podem ser adaptadas, com foco especial em propostas incentivando empresas de logística reversa, reciclagem, reutilização e recuperação de módulos.

O motivo do grande foco na China é pelo simples fato que o mercado é dominado por empresas chinesas, cerca de 89% das unidades vendidas no Brasil vem de empresas chinesas, a maior empresa brasileira, WEG, representa apenas 1% das vendas do mercado (Folha de São Paulo, 2024), por esse motivo faz sentido entender melhor como funciona no País que mais desenvolveu a energia solar fotovoltaica.

7.2 Gestão de Resíduos Fotovoltaicos na China

Sendo um dos maiores mercados mundiais de módulos fotovoltaicos, a China está na vanguarda dos desafios da reciclagem e da gestão de resíduos destes sistemas” (WANG 2024). Nos últimos anos, o Governo chinês implementou uma série de políticas proativas destinadas a abordar as questões ambientais relacionadas com a gestão de resíduos, em especial no setor fotovoltaico. Entre essas políticas destaca-se a Lei de Promoção da Economia Circular de 2008, que foi alterada para incentivar as práticas de reciclagem e a reutilização de materiais estratégicos. Estas políticas estabelecem objetivos claros para a reciclagem de componentes de módulos solares, como o silício, o vidro e os metais preciosos, e promovem a economia circular em sectores-chave da economia (BLEISCHWITZ 2022). Estas políticas têm por objetivo recuperar até 85% dos materiais dos módulos e promover a reciclagem e a reutilização de recursos essenciais (PREET; SMITH, 2020).

O governo chinês adotou algumas políticas de incentivo ao setor fotovoltaico, a exemplo subsídios à produção de painéis solares e ao desenvolvimento de energias renováveis (GALA, 2024) e também de acordo com a

Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma da China (2023) fortificou a regulamentação ambiental e tornou-a mais restritiva para fabricantes de módulos solares. Essas medidas visam garantir que o setor fotovoltaico no país se adapte aos princípios da economia circular estipulados pela Lei de Promoção da Economia Circular da República Popular da China de 2008, o que reduziu a dependência de matérias-primas virgens.

A China também teve outro grande avanço importante, que foi a implementação de infraestrutura especializada para a reciclagem de painéis fotovoltaicos, com investimento na construção de centros de reciclagem automatizados e no desenvolvimento de tecnologias que possibilitam a recuperação eficiente de até 85% dos materiais dos módulos (PREET; SMITH, 2020). Essa iniciativa reforça o compromisso do país com a sustentabilidade e estabelece um modelo a ser seguido por outras nações, como o Brasil, que ainda precisam avançar em suas práticas de reciclagem no setor solar. Entre as técnicas utilizadas nesses centros estão os processos mecânicos, responsáveis pela separação de vidro e alumínio; os tratamentos térmicos, que promovem a remoção dos encapsulantes e de materiais orgânicos; e os métodos químicos, que permitem a extração seletiva de silício e de metais preciosos como prata e cobre com alto grau de pureza (ZHOU et al., 2024). A combinação dessas tecnologias tem proporcionado à China uma elevada taxa de recuperação de materiais, consolidando sua posição de liderança na gestão sustentável de resíduos fotovoltaicos.

Para além das políticas estabelecidas, a China também investiu fortemente na melhoria das tecnologias de reciclagem aplicadas aos módulos fotovoltaicos (BLEISCHWITZ, 2022). Estas inovações permitiram a recuperação eficiente de uma grande parte do material dos módulos, especialmente o vidro e o silício, que podem depois ser reutilizados na produção de novos módulos fotovoltaicos através de processos avançados de refinação (BLEISCHWITZ, 2022.). Estima-se que até 85% dos componentes possam ser recuperados com estas tecnologias (PREET; SMITH, 2020), contribuindo de forma significativa para a sustentabilidade do setor. O desenvolvimento destas soluções é o resultado de uma cooperação ativa entre o governo e setor privado, facilitada por parcerias público-privadas (PPP). Estas Parcerias são fundamentais para garantir a adoção de tecnologias de ponta e a

criação de infraestruturas apoio uma logística reversa eficiente (BLEISCHWITZ 2022). A combinação de incentivos fiscais e apoio governamental facilitará o sucesso destas iniciativas e será crucial para reforçar o papel de liderança da China (BLEISCHWITZ 2022).

Na China, a promoção da economia circular no setor fotovoltaico tem sido impulsionada por políticas públicas robustas e investimentos em infraestrutura voltados à logística reversa. O governo chinês estabeleceu diretrizes nacionais para o descarte e a reciclagem de equipamentos fotovoltaicos, exigindo que fabricantes projetem produtos mais facilmente desmontáveis e recicláveis (BLEISCHWITZ, 2022). Em paralelo, empresas especializadas têm implementado centros de reciclagem automatizados, como a Nantong Riyixin Environmental Protection Technology, cuja capacidade de processamento anual chega a 15.000 toneladas de módulos. Em 2023, estima-se que mais de 100 mil módulos foram reciclados no país, representando cerca de 60.000 kW de capacidade desinstalada (PREET; SMITH, 2020). Esses centros utilizam técnicas mecânicas, térmicas e químicas para recuperar materiais valiosos como vidro, alumínio, silício, prata e cobre, alcançando uma taxa de recuperação superior a 85% (ZHOU et al., 2024). Além disso, a China estabeleceu uma rede em expansão de coleta de módulos, especialmente em regiões com alto volume de instalações antigas, como Zhejiang, onde já se planeja a reciclagem de mais de 100.000 kW de capacidade até 2027 (RESOLARTECH, 2024). Esse modelo integrado de logística reversa, baseado em regulação, incentivos fiscais e apoio tecnológico, serve como referência para o Brasil estruturar seu próprio sistema de gestão de resíduos fotovoltaicos.

7.3 Contexto Brasileiro

No Brasil, o setor fotovoltaico também enfrenta grandes desafios na questão de gestão de resíduos (SOUSA et al., 2023). Embora o setor esteja a crescer rapidamente, o Brasil ainda não dispõe de um quadro regulamentar específico para a reciclagem de módulos fotovoltaicos (SOUSA et al., 2023). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) abrange a gestão de resíduos eletrônicos, mas não aborda explicitamente os resíduos gerados a partir de módulos fotovoltaicos, o que é uma barreira para o desenvolvimento de uma infraestrutura de reciclagem adequada (SOUSA et al., 2023).

A falta de incentivos financeiros para empresas dispostas a investir em logística reversa e reciclagem de módulos solares é outro grande obstáculo (SOUSA et al., 2023). De acordo com Sousa (2021), a legislação brasileira ainda carece de mecanismos políticos e regulatórios para promover a reciclagem de componentes fotovoltaicos, o que causa uma grande dificuldade na criação de uma economia circular nesse setor. Nesse sentido, é essencial que o Brasil adote medidas mais proativas para evitar que o crescente número de módulos envelhecidos se torne um problema ambiental, especialmente porque muitos desses módulos já atingiram o fim de sua vida útil.

7.4 Propostas de Ações para o Brasil

Com base nas lições aprendidas na China, propõe-se uma série de ações detalhadas que podem ser implementadas no Brasil para reduzir o impacto ambiental dos resíduos fotovoltaicos e para incentivar o desenvolvimento de empresas especializadas em logística reversa, reciclagem, reutilização e recuperação de módulos solares.

7.4.1 Criação de um Marco Regulatório Nacional

É essencial que o Brasil crie um quadro regulamentar específico para a gestão dos resíduos fotovoltaicos. Este quadro deve incluir objetivos claros para a reciclagem e reutilização componentes mecanismos de execução para garantir que esses objetivos sejam cumpridos (SOUSA et al., 2023). Políticas semelhantes já estão em vigor na China, onde o governo estabeleceu diretrizes rígidas sobre economia circular e promoveu a criação de incentivos fiscais para empresas que investem em tecnologia de reciclagem de módulos fotovoltaicos (BLEISCHWITZ 2022). A adaptação dessas práticas ao contexto brasileiro permitiria acelerar o desenvolvimento de uma infraestrutura nacional para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos.

7.4.2 Incentivo à Logística Reversa

A logística reversa é essencial para a reciclagem dos módulos fotovoltaicos. O estabelecimento de uma rede nacional de pontos de coleta de módulos solares, como praticado em outros países, pode garantir coleta e destinação eficiente dos

resíduos (SOUSA et al., 2023). Inspirado na experiência da China, o Brasil poderia adotar medidas para promover a economia circular, incentivando as empresas de energia solar a adotarem sistemas de logística reversa, com apoio governamental por meio de incentivos fiscais e subsídios. A China tem desenvolvido um sistema estruturado para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, incluindo a criação de centros especializados em reciclagem, como o Centro de Desenvolvimento da Indústria de Reciclagem Fotovoltaica de Jiaxing, na província de Zhejiang. Este centro, vinculado ao Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação, lidera iniciativas de coleta e processamento de módulos desativados, colaborando com fabricantes e operadores para garantir o descomissionamento adequado dos equipamentos ao final de sua vida útil (CHINA DAILY, 2023). Além disso, a China estabeleceu diretrizes nacionais que proíbem o descarte de módulos fotovoltaicos em aterros sanitários, incentivando a responsabilidade estendida do produtor e promovendo a criação de clusters industriais dedicados à reutilização desses equipamentos. Essas ações visam fortalecer a trajetória verde e sustentável do país, criando um mercado significativo para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos, estimado em até 150 bilhões de yuans (aproximadamente 21 bilhões de dólares) até 2040 (CHINA DAILY, 2023).

7.4.3 Parcerias Público-Privadas e Fomento à Inovação Tecnológica

As parcerias público-privadas (PPPs) desempenham um papel importante no desenvolvimento de tecnologias avançadas de reciclagem e na criação de uma infraestrutura eficiente para a gestão de resíduos fotovoltaicos (KHAWAJA; GHATH; ALKHALIDI, 2021). No Brasil, startups e empresas inovadoras que buscam investir na reciclagem de módulos fotovoltaicos, o governo pode facilitar a criação de PPP, fornecendo-lhes financiamento e assistência técnica. Além disso, a cooperação com universidades e centros de pesquisas pode acelerar o desenvolvimento de tecnologias nacionais permitindo ao Brasil desenvolver soluções competitivas a nível internacional.

7.4.4 Criação de Centros de Reciclagem Regionais

Um dos maiores obstáculos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil é a falta de infraestrutura local, onde não é totalmente implantada, apenas

metade dos estados possui pontos de coleta (SOUSA et al., 2023), Hoje, apenas São Paulo e Minas Gerais possuem pontos de coleta no Brasil através da empresa SunR. Proponho a criação de centros de reciclagem estrategicamente localizados nas capitais dos estados para atender o grande volume dos 70% da GD e em cidades do interior onde tenha as grandes usinas da GC para garantir que os módulos fotovoltaicos sejam processados de forma sustentável. Estes centros poderiam funcionar como pólos de inovação para desenvolver novas tecnologias de reciclagem, promover a reutilização eficiente de materiais como o silício e o vidro e reforçar a economia circular neste setor.

7.4.5 Sensibilização e Educação Ambiental

A educação ambiental é essencial para o sucesso iniciativas de gestão de resíduos (BLEISCHWITZ 2022). No Brasil, campanhas de sensibilização dirigidas à população e aos setores industriais podem aumentar o cumprimento da logística reversa e incentivar os consumidores a tomarem decisões mais sustentáveis, tal como na China (BLEISCHWITZ 2022). Além disso, é essencial que os fabricantes e distribuidores de módulos solares sejam educados sobre suas responsabilidades na gestão de resíduos e incentivados a adotar práticas de economia circular (SOUSA et al., 2023).

7.5 Considerações Finais

O Brasil tem uma oportunidade única de adotar medidas para promover a sustentabilidade no setor da energia solar, inspirando-se no modelo de gestão de resíduos fotovoltaicos da China. Através da implementação de políticas de economia circular, do incentivo à inovação, de parcerias público-privadas e construção de uma infraestrutura robusta de logística reversa, o Brasil pode reduzir significativamente o impacto ambiental dos módulos fotovoltaicos envelhecidos e estabelecer-se como um líder regional em sustentabilidade energética.

Este estudo de caso demonstra que o cenário brasileiro de gestão de resíduos fotovoltaicos pode ser transformado com a adoção das melhores práticas internacionais, como as desenvolvidas na China. Ao adotar uma abordagem nacional focada em soluções sustentáveis, o Brasil pode garantir um futuro mais verde e mais eficiente para o setor de energia solar.

8. Conclusões e Perspectivas

O estudo destaca a importância da adoção de estratégias robustas e coordenadas para reduzir o impacto ambiental do envelhecimento dos módulos fotovoltaicos no Brasil. Estima-se que o crescimento acelerado do setor da energia solar no país começará a gerar uma grande quantidade de resíduos fotovoltaicos num futuro próximo, o que constitui um desafio fundamental para a sustentabilidade do setor. A gestão destes resíduos requer não só a implementação de soluções tecnológicas sofisticadas, mas também um quadro regulamentar, econômico e logístico bem planejado.

Uma das principais conclusões deste estudo é a necessidade urgente de um marco regulatório específico para a gestão de resíduos de PV no Brasil. Atualmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) trata da gestão de resíduos eletrônicos em geral, mas não há diretrizes claras específicas para módulos fotovoltaicos. Essa lacuna regulatória dificulta o desenvolvimento de uma infraestrutura adequada de reciclagem e logística reversa. O estabelecimento de um marco regulatório específico para módulos fotovoltaicos é fundamental para garantir que fabricantes e distribuidores possam assumir responsabilidade por todo o ciclo de vida de seus produtos, desde a produção até o descarte reutilização, e estabeleçam metas claras de reciclagem e reutilização.

Além disso, o estudo salienta a importância de proporcionar incentivos econômicos às empresas para que invistam em soluções de reciclagem e recuperação de módulos fotovoltaicos. A adoção de políticas públicas que ofereçam incentivos fiscais, subsídios e créditos de carbono, bem como a introdução de mecanismos de Responsabilidade estendida do Produtor (REP), podem encorajar as empresas a participar ativamente na gestão sustentável dos resíduos. Estas Medidas são essenciais para que o processo de reciclagem se torne economicamente viável e atrativo para as empresas para incentivar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras neste domínio.

Outro aspecto importante discutido neste estudo é a necessidade de uma infraestrutura de logística reversa eficiente, tendo centro de coletas e reciclagem que serão distribuídos de forma estratégicas ao longo do território nacional. A criação de

uma rede nacional de pontos de recolha pode facilitar o regresso dos módulos fotovoltaicos em fim de vida ao ciclo de produção e facilitar a recuperação de materiais valiosos como silício, o cobre, o alumínio e a prata. A logística reversa não só reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros, como também permite a reintrodução de recursos na cadeia de produção, contribuindo para uma economia mais circular e sustentável.

A experiência de outros países, como a China, demonstrou que a implementação de parcerias público-privadas (PPP) pode ser uma solução eficaz para ultrapassar os desafios logísticos e técnicos envolvidos na reciclagem de módulos fotovoltaicos. Essas parcerias permitem o desenvolvimento de tecnologias de ponta, como a reciclagem térmica e química, que são essenciais para a recuperação eficiente de materiais críticos. No Brasil, a promoção de PPP, combinada com o apoio do governo, pode acelerar o desenvolvimento de infraestrutura para reciclagem e recuperação de módulos e promover a inovação nesta área.

A prática de reciclagem e recuperação de módulos fotovoltaicos também merece atenção. A reutilização de módulos em novos projetos, especialmente em zonas rurais e remotas onde a máxima eficiência energética não é um pré-requisito, pode prolongar a vida útil dos painéis e reduzir a procura de novos materiais. A recuperação de módulos através da substituição de componentes defeituosos pode prolongar a vida útil em até 10 anos, constituindo uma alternativa economicamente viável em zonas com capacidade financeira limitada. Estes Métodos Não Só Reduzem a quantidade de resíduos gerados, como também ajudam a conservar recursos naturais valiosos e reduzir a pegada ecológica do setor.

Um desafio fundamental para o êxito destas iniciativas é a sensibilização dos consumidores e dos fabricantes. Campanhas de educação ambiental voltadas para o público em geral, programas de treinamento para fabricantes e distribuidores são essenciais para garantir que todos os atores da cadeia produtiva entendam suas responsabilidades na gestão sustentável dos resíduos fotovoltaicos. Para que o Brasil caminhe para uma economia sustentável, é fundamental que os consumidores participem ativamente na devolução dos módulos no final da sua vida útil e que os fabricantes se envolvam na introdução de práticas de economia circular.

8.1 Perspectivas Futuras

O Brasil está Estrategicamente Posicionado Para se tornar um líder regional na gestão de resíduos fotovoltaicos. O desenvolvimento de uma infraestrutura de reciclagem eficiente, incentivos econômicos e um quadro regulamentar claro têm o potencial de reduzir os impactos ambientais associados à eliminação de grandes quantidades de módulos fotovoltaicos. A promoção da economia circular de reciclagem, reutilização e recuperação de módulos pode contribuir significativamente para a redução da pegada ecológica do setor de energia solar, ao mesmo tempo que cria novas oportunidades de negócio e emprego no Brasil.

A inovação tecnológica é um elemento fundamental para o sucesso de uma política de reciclagem e recuperação de módulos fotovoltaicos. O investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e o estabelecimento de cooperação entre universidades, centros de pesquisa e empresas são essenciais para que o Brasil possa Desenvolver as suas próprias soluções tecnológicas adaptadas às suas necessidades e à sua situação geográfica econômica. Novas tecnologias, como a pirólise e a reciclagem química avançada, podem aumentar a taxa de recuperação de materiais críticos e reduzir o impacto ambiental dos processos de reciclagem.

Por último, a transição para uma economia circular no setor da energia solar exige uma ação concertada dos governos, da indústria e da sociedade civil. O envolvimento de todas as partes interessadas é essencial para que o Brasil avance na gestão sustentável dos resíduos fotovoltaicos para que a energia solar continue a desempenhar um papel central na transição para uma matriz energética limpa e renovável. Com as políticas certas, o Brasil pode não só reduzir o impacto ambiental dos módulos fotovoltaicos envelhecidos, mas também aproveitar a oportunidade para promover o desenvolvimento sustentável e a inovação no setor de energia solar.

REFERÊNCIAS

BLEISCHWITZ, Raimund. The circular economy in China: Achievements, challenges and potential implications for decarbonisation. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360079126_The_circular_economy_in_China_Achievements_challenges_and_potential_implications_for_decarbonisation. Acesso em: 31 de março de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,84 GW em 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024>. Acesso em: 31 de março de 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 02 set. 2024.

BUERHOP-LUTZ, Claudia; STROYUK, Oleksandr; PICKEL, Tobias; WINKLER, Thilo; HAUCH, Jens; PETERS, Ian Marius. *PV modules and their backsheets – A case study of a Multi-MW PV power station*. Solar Energy Materials and Solar Cells, [S.l.], v. 231, p. 111295, 2021. DOI: [10.1016/j.solmat.2021.111295](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111295). Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2105.05462>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CHAE, Y.; KIM, H. C.; CHOI, W.; KIM, H. S. Analysis on the water footprint of crystalline silicon photovoltaic system. *Clean Technology*, v. 20, n. 6, p. 449–456, 2014. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO201402755362213.page>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CHINA. Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China. Promulgada em 29 de agosto de 2008, entrando em vigor em 1 de janeiro de 2009. Disponível em: <https://www.ecolex.org/details/legislation/circular-economy-promotion-law-of-the-peoples-republic-of-china-lex-faoc149802/>. Acesso em: 31 de março de 2025.

COSTA, André Luis Crispim; HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; FERREIRA, Reginaldo Vagner. *Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV*. Ambiente Construído, v. 21, n. 1, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/109532>.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). *Recycling Strategies for Photovoltaic Systems*. 2016.

FARRELL, C. C. et al. ,v. 128, p. 109911, 2020. FERNANDES, L.; OLIVEIRA, J.; SOUSA, H. Viabilidade econômica da reciclagem de painéis fotovoltaicos no Brasil. *Journal of Renewable Energy and Environment*, v. 15, n. 3, p. 105-119, 2023.

FERREIRA, L. S.; OLIVEIRA, R. T. Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 12, n. 3, p. 87-102, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/262128/001173058.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2025.

FERREIRA NETO, J. B. et al. *Obtenção de silício grau solar por rota metalúrgica*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2014. Disponível em: <https://ipt.br/2021/09/02/obtencao-de-silicio-grau-solar-por-rota-metalurgica>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FOLHA DE S.PAULO. Chinesas dominam 90% do mercado solar brasileiro. *Folha de S.Paulo*, São Paulo, 1 jul. 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/colunas/painelsa/2024/07/chinesas-dominam-90-do-mercado-solar-brasileiro.shtml>. Acesso em: 31 de março de 2025.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C.; ALSEMA, E. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science & Technology*, 2008.

GALA, Paulo. *O sucesso da indústria de painéis solares na China*. 2024. Disponível em: <https://www.paulogala.com.br/o-sucesso-da-industria-de-painéis-solares-na-china/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14044. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. 1st ed. Geneva: ISO, 2006.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. 2016. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. Acesso em: 04 set. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, 2014.

KHAWAJA, Mohamad K.; GHATH, Marwa; ALKHALIDI, Ammar. *Public-private partnership versus extended producer responsibility for end-of-life of photovoltaic modules management policy*. 2021

KRAEMER, F.; WIESE, S. Assessment of long term reliability of photovoltaic glass–glass modules vs. glass-back sheet modules subjected to temperature cycles by FE-analysis. *Microelectronics Reliability*, [S.l.], v. 55, n. 5, p. 716–723, abr. 2015. DOI: [10.1016/j.microrel.2015.02.007](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.02.007).

LIU, C.; ZHANG, Q.; WANG, H. *Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China*. Waste Management, v. 118, p. 491–500, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.052>.

OLIVEIRA, C.; FREITAS, J.; PEREIRA, S. Logística reversa no setor solar brasileiro: um panorama atualizado. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 14, n. 1, p. 30-48, 2023.

OLIVEIRA, E. V. *Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65187/1/2021_tcc_evoliveira.pdf. Acesso em: 23 fev. 2025.

OTTONELLI, Janaina; CRUZ, Ulysses de Brito; ROSA, Adriano Costa; ANDRADE, José Célio Silveira. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 52, n. 4, p. 8-26, out./dez. 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/download/1199/905/5035>. Acesso em: 6 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Global E-Waste Monitor. 2019.

PEREIRA, Mariana Bisinotto; SOUZA, Guilherme Botelho Meireles de; ESPINOSA, Denise Crocce Romano; PAVÃO, Leandro Vitor; ALONSO, Christian Gonçalves; CABRAL, Vladimir Ferreira. Simultaneous recycling of waste solar panels and treatment of persistent organic compounds via supercritical water technology. *Environmental Pollution*, Amsterdam, v. 335, e122331, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122331>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123013337>. Acesso em: 15 abr. 2025.

PREET, S.; SMITH, S. T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon-based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, p. 109917, 2020.

RAMOS, Pedro Camilo. *Abordagem termoquímica da reciclagem de painéis fotovoltaicos e valorização das frações obtidas: recuperação de energia e ensaios de incorporação em materiais de construção*. 2022. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/160828/1/Ramos_2022.pdf. Acesso em: 23 fev. 2025.

RESOLARTECH. *Ten years outlook of China's PV equipment replacement policies*. 2024. Disponível em: https://www.resolartech.com/en/news/hangyexinwen/pv_equipment_replacement_policies_10years_oct2024.html. Acesso em: 15 abr. 2025.

SANTOS, L. R. dos. *Análise do Ciclo de Vida de painéis Solares e Seu Impacto Ambiental*. 2022. Disponível em:

<https://scientiaetratio.com.br/analise-do-ciclo-de-vida-de-painés-solares-e-seu-impacto-ambiental/>.

Sousa, N. M., Oliveira, C. B. M., & Cunha, D. (2023). *Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles*. Social Sciences & Humanities Open, 7(1), 100456. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456>

SOUZA, José; FERREIRA, Marcos; MENDES, Felipe. *Células solares e painés fotovoltaicos*. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365360481_Celulas_Solares_e_painés_Fotovoltaicos.

SOUZA, R. A. de; PEREIRA, E. S.; FERREIRA, L. F. P. *Análise do Ciclo de Vida de painés Solares e Seu Impacto Ambiental*. Scientia et Ratio, 2022. Disponível em: <https://scientiaetratio.com.br/analise-do-ciclo-de-vida-de-painés-solares-e-seu-impacto-ambiental/>.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (Sudene). *Fiat: empreendimento financiado pela Sudene inicia montagem das prensas em seu parque industrial*. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/assuntos/noticias/fiat-empreendimento-financiado-pe-la-sudene-inicia-montagem-das-prensas-em-seu-parque-industrial>. Acesso em: 15 abr. 2025.

WANG, T.; LI, F.; ZHOU, H. Anticipating future photovoltaic waste generation in China. *Energy Policy*, 2024.

ZHANG, D.; HUANG, G.; XU, Y.; GONG, Q. Waste-to-energy in China: key challenges and opportunities. *Energies*, v. 8, p. 14182-14196, 2015.

ZHOU, Y.; WEN, J.; ZHENG, Y.; YANG, W.; ZHANG, Y.; CHENG, W. *Status quo on recycling of waste crystalline silicon for photovoltaic modules and its implications for China's photovoltaic industry*. *Frontiers in Energy*, [S.l.], v. 18, n. 5, p. 685–698, 2024. DOI: 10.1007/s11708-024-0923-y. Disponível em:

<https://journal.hep.com.cn/fie/EN/10.1007/s11708-024-0923-y>. Acesso em: 15 abr. 2025.