

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS NEPOMUCENO**

Daniel Luiz de Souza

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA IMPLANTAÇÃO
E DESCARTE DE PAINÉIS SOLARES NO BRASIL:
Reutilização das Células de Silício**

NEPOMUCENO

2025

DANIEL LUIZ DE SOUZA

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA IMPLANTAÇÃO
E DESCARTE DE PAINÉIS SOLARES NO BRASIL:
Reutilização das Células de Silício**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Bruno Senna Corrêa

NEPOMUCENO

2025

DANIEL LUIZ DE SOUZA

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA IMPLANTAÇÃO E
DESCARTE DE PAINÉIS SOLARES NO BRASIL:
Reutilização das Células de Silício**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 15 de julho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO SENNA CORREIA**
Data: 23/07/2025 09:59:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Senna Corrêa

CEFET-MG

Documento assinado digitalmente
 **REGINALDO BARBOSA FERNANDES**
Data: 24/07/2025 07:01:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Fernandes

CEFET-MG

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO WLADIMIR SANTANA**
Data: 24/07/2025 16:00:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. MSc. Márcio Wladimir Santana

CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Gostaria deixar meus mais sinceros agradecimentos a todos que colaboraram para realização deste projeto. Agradeço a toda equipe desta prestigiada instituição por todo o apoio acadêmico. Um agradecimento aos meus colegas estudantes pelo apoio e incentivo, também gostaria de agradecer o meu orientador que foi uma peça-chave para que este trabalho fosse desenvolvido. Por fim, não poderia deixar de agradecer a minha família por seu suporte durante a elaboração deste trabalho.

EPÍGRAFE

*tempo de rasgar e tempo de remendar;
tempo de ficar calado e tempo de falar.*

*Há tempo de amar e tempo de odiar;
tempo de guerra e tempo de paz.*

Eclesiastes 3, 7-8

RESUMO

Este estudo tem como foco analisar os impactos ambientais decorridos da implantação e descarte de painéis fotovoltaicos no Brasil, com foco em sua logística reversa apresenta-se um projeto de reutilização de células de silício em estruturas de pequeno porte. As placas solares possuem componentes que podem ser fontes poluentes para o solo e fluxos hídricos pois possuem metais pesados em sua composição, devido a isso quando ocorre um descarte inadequado impacta diretamente ou indiretamente o meio ambiente. Faz - se necessário uma boa estrutura de logística reversa e opções de reutilização destes componentes. O estudo evidencia dados estatísticos sobre a situação da implantação e descarte de placas solares nos últimos anos e também apresenta um modelo de projeto de pequeno porte alimentado por células de silício derivadas de painéis descartados. O trabalho em questão busca apresentar opções sustentáveis para a crescente demanda por “Tecnologias limpas”.

Palavras-chave: Impactos Ambientais. Células de Silício. Descarte de Painéis. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study focuses on analyzing the environmental impacts resulting from the implementation and disposal of photovoltaic panels in Brazil, with particular emphasis on reverse logistics. It presents a project for reusing silicon cells in small-scale structures. Solar panels contain components, including heavy metals, that can pose risks to soil and water flows if improperly discarded, thus directly or indirectly affecting the environment. Therefore, the establishment of an effective reverse logistics system and viable reuse alternatives for these components is essential. The study provides statistical data on the deployment and disposal of solar panels in recent years and introduces a small-scale project powered by silicon cells recovered from discarded panels. The work aims to propose sustainable solutions in response to the increasing demand for “clean technologies”.

Keywords: Environmental Impacts. Silicon Cells. Panel Disposal. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Junção P - N de uma célula fotovoltaica de silício	17
Figura 2 - Avanço da implantação de energia fotovoltaica no Brasil	18
Figura 3 - Relação Oferta - Demanda de Placas Solares	18
Figura 4 - Sistema Off-Grid.....	19
Figura 5 - Sistema On-Grid	20
Figura 6 - Construção do Paine Solar	21
Figura 7 - Eficiência das Gerações de Células Fotovoltaicas.....	23
Figura 8 - Fluxograma do Ciclo de reciclagem das Células de Silício.....	26
Figura 9 - Fontes de Pesquisa	29
Figura 10 - Distribuição da energia solar nos últimos 10 anos.	30
Figura 11 - Empregos e Investimentos - Potência Instalada.	31
Figura 12 - Projeção de Geração de Resíduos Fotovoltaicos	32
Figura 13 - Composição Média de um Paine Solar	33
Figura 14 - Eficiência Estimada de Reciclagem por Material.....	33
Figura 15 - Classificação de Risco Ambiental por Geração de Paine	34
Figura 16 - Iniciativas Sustentáveis Relacionadas a energia Solar	35
Figura 17 - Projetos de Pequeno Porte	36
Figura 18 - Propostas de Políticas Públicas.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes Integrantes dos Painéis Solares	21
Tabela 2 - Características das Gerações das Placas de Silício	22
Tabela 3 - Fatores de degradação dos Painéis Solares	24
Tabela 4 - Simplificação de Resíduos de Painéis Fotovoltaicos.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIGS – Cobre, Índio, Gálio e Selênio

EIA – Energy Information Administration – Administração de Informação sobre Energia

EVA – Acetato de Etileno-Vinila

IEA – International Energy Agency – Agência Internacional de Energia

IRENA – International Renewable Energy Agency – Agência Internacional de Energia Renovável

NREL – National Renewable Energy Laboratory – Laboratório Nacional de Energia Renovável

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PV – Photovoltaic (Fotovoltaico)

LISTA DE SÍMBOLOS

Al - Alumínio

Ag - Prata

Cd - Cádmio

Cr - Cromo

Cu - Cobre

Pb - Chumbo

Si - Silício

Sn - Estanho

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Placas de Silício	17
2.1.1	Desafios do Descarte de Painéis de Silício	17
2.2	Componentes Integrantes dos Painéis Solares	20
2.3	Geração de Silício	22
2.4	Degradação de Painéis Solares: Causas e Impactos na Eficiência	23
2.5	Legislação Brasileira e a Logística Reversa de Painéis Solares	24
2.5.1	Base Legal e Propostas Legislativas	24
2.5.2	Desafios da Implementação	25
2.6	Reutilização das Células de Silício	26
3.	METODOLOGIA	28
3.1	Abordagem Metodológica	28
3.2	Revisão Bibliográfica	28
3.3	Coleta de Dados	28
3.4	Análise de Dados	28
3.4.1	Apresentação de áreas de reuso das células fotovoltaicas	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Demanda por placa solares	30
4.2	Reutilização do Silício	34
4.2.1	Projetos de Pequeno Porte com Placas Reutilizadas	36
5.	CONCLUSÃO	38
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A disseminação das energias renováveis reflete a mediação das pressões ambientais e a legitimação da postura de redução das emissões de gases responsáveis pelo agravamento do aquecimento global; portanto, é notável a resposta da energia solar, por tratar-se da grande disponibilidade e acesso, principalmente no Brasil, em virtude do clima, com o potencial de aplicação do uso dos painéis fotovoltaicos. Sendo assim, expandiremos o uso destes, mas detalharemos algumas questões sérias de gestão de resíduos, especialmente após a vida útil, surgindo um novo desafio ambiental.

Apesar de eficientes na geração de energia, o descarte inadequado dos painéis solares pode causar contaminação do solo e da água por metais pesados entre outras substâncias tóxicas. Na verdade, a ausência de políticas públicas de governança e marcos legais, juntamente com estruturas logísticas equitativas de reciclagem, preocupa pelos impactos reversíveis nas questões da sociedade.

Portanto, os desafios são fundamentais para identificar integrações de curto a longo prazo que incluam todos os estágios do ciclo de vida dos painéis solares; isso significa que se deve extrair todos os materiais, destruí-los, reutilizá-los ou reciclá-los, a fim de garantir a utilização responsável, tanto pela sociedade quanto pelo ambiente em andamento.

É nesses termos que o presente trabalho aborda a gestão dos resíduos fotovoltaicos no Brasil, tratando das oportunidades e problemas para práticas mais sustentáveis na promoção da sociedade e do ambiente envolvidos e também apresenta a viabilidade da reutilização de células de silício em projetos de pequeno porte.

1.1 Objetivos

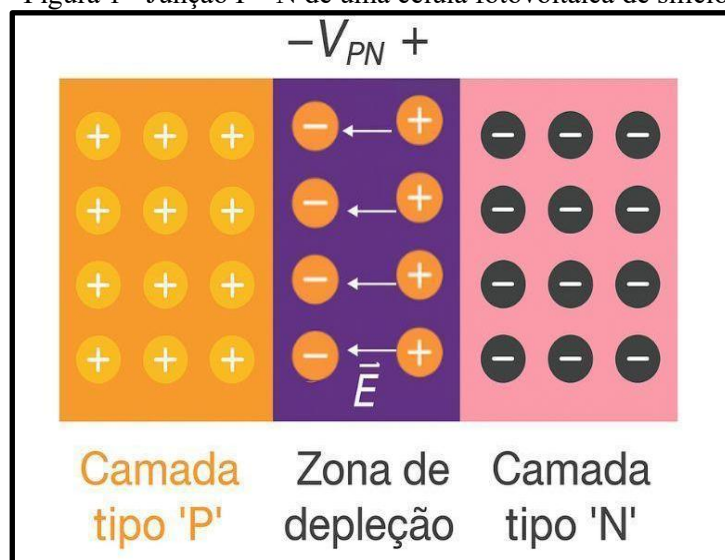
Os objetivos deste trabalho envolvem a análise dos impactos ambientais decorrentes da implantação e do descarte de painéis solares, bem como apresentar uma pesquisa relacionada à reutilização de células de silício em projetos de pequeno porte.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Placas de Silício

O silício é o principal componente semiconductor usado na fabricação das células fotovoltaicas, sendo esse responsável pela conversão dos raios solares em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Quando dopado com elementos como fósforo e boro, o silício forma uma junção P-N que permite a geração de corrente elétrica ao ser exposto à luz (GREEN, 2000). A figura 1 apresenta a junção P-N onde pode-se observar a camada ‘Tipo P’ onde frequentemente é associado a uma polarização positiva direta, a camada “Tipo N” onde frequentemente é associado a uma polarização negativa.

Figura 1 - Junção P - N de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Adaptado de BOYLESTAD & NASHELSKY, 2014.

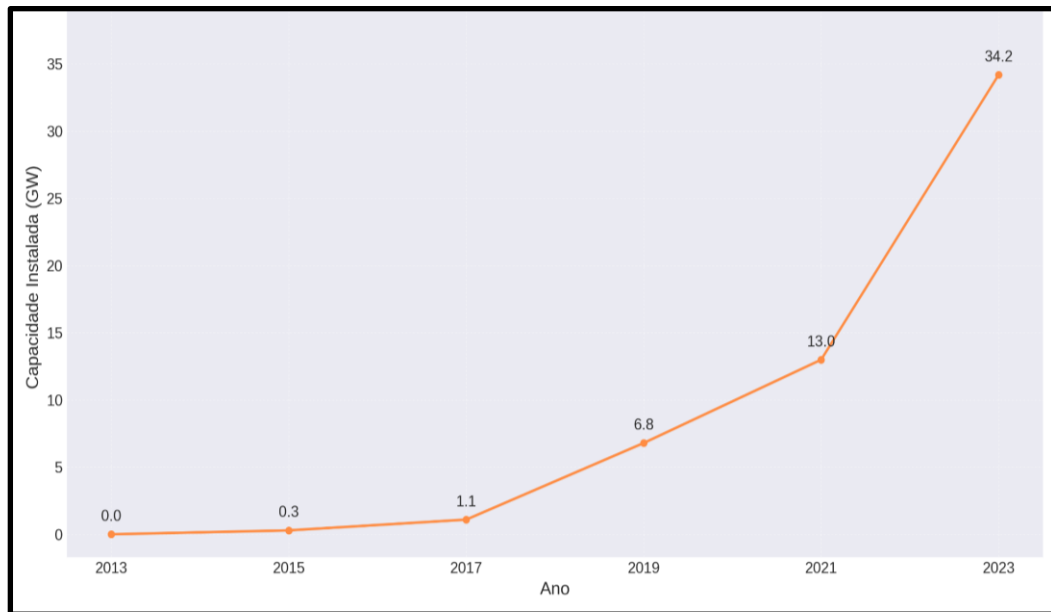
2.1.1 Desafios do Descarte de Painéis de Silício

Os maiores desafios referentes ao descarte de painéis solares integram as principais problemáticas da energia solar desse gênero. Ainda conforme alerta Pedrosa et al. (2023), o aumento progressivo em relação à instalação de sistemas solares fotovoltaicos no Brasil existe onde há a insuficiência de normativas a respeito do gerenciamento e a reutilização de rejeitos provenientes destes equipamentos. Esta lacuna dificulta colocar essas medidas que garantem a sustentabilidade no contexto de administração de resíduos perigosos, como por exemplo os metais pesados.

Cruz et al. (2020) expandem sua avaliação enfatizando a importância da logística reversa como a principal estratégia para diminuir o efeito ambiental. No entanto, escritores brasileiros observam a inadequação da estrutura apropriada para reunir e reutilizar materiais, o

que restringe a perspectiva de usar políticas públicas mais inovadoras dentro do campo. A figura 2 apresenta dados referentes ao crescimento da adoção dos painéis solares no Brasil.

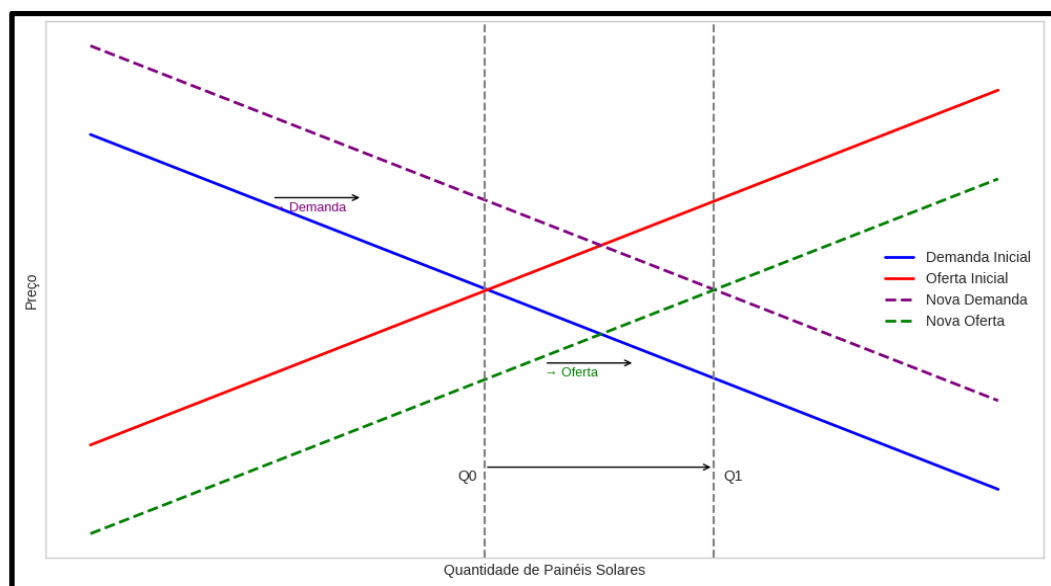
Figura 2 - Avanço da implantação de energia fotovoltaica no Brasil



Fonte: Adaptado de DINIZ, 2023

A figura 3 apresenta a relação oferta e demanda dos painéis solares onde a oferta é impulsionada pelo surgimento de novas tecnologias, políticas de energia limpa entre outros, a demanda é a relação da procura por painéis solares onde é impulsionada por questões econômicas visando redução de custos e autonomia energética.

Figura 3 - Relação Oferta - Demanda de Placas Solares

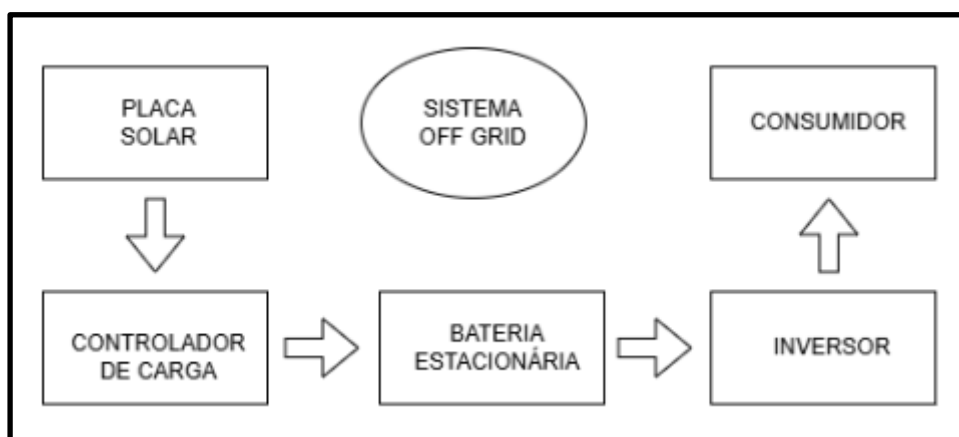


Fonte: Elaborado pelo o autor, 2025.

De acordo com as pesquisas, os painéis solares descartados se tornam uma ameaça ambiental real devido à presença de lixo químico. A partir da pesquisa de Fagundes et al. (2023), conclui-se que os estudos sobre o descarte adequado, levando em consideração os compostos químicos, demonstram que esses painéis se tornam altamente tóxicos quando liberados no solo, como “restos” de plástico contendo chumbo e cádmio. Quando se esvaziam, contaminam a água subterrânea, causando danos significativos ao ambiente, agravados pelo desperdício dos resíduos e pela falta de gestão na eliminação/reuso adequado dos mesmos. Adicionalmente, o estudo de Cavalcante et al. (2022) compara as distinções das tecnologias On-Grid e Off-Grid e destaca que a proliferação dessas tecnologias exige um cuidado contínuo para reduzir tais ameaças ambientais.

Os sistemas Off-Grid são sistemas que utilizam baterias para armazenar energia durante certo período, ou seja, são independentes da rede de distribuição.

Figura 4 - Sistema Off-Grid

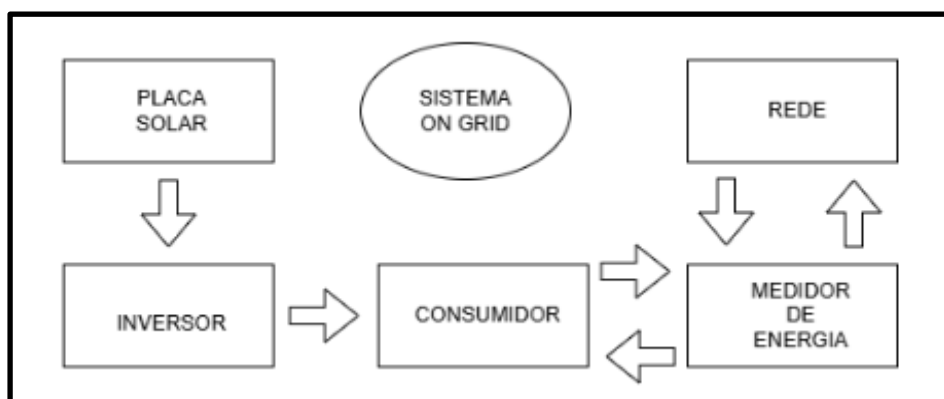


Fonte: O autor, 2025.

Os sistema On-Grid são ligados a rede da concessionária e fornecem crédito de energia excedente, este sistema tende a ser muito mais barato em comparação com o sistema Off-Grid pois não demanda banco de baterias, a desvantagem é que não possui autonomia como o sistema Off-Grid.

Sobre os Sistemas Off-Grid e On-Grid, cada projeto tem sua finalidade e demanda e cabe ao consumidor analisar qual a sua necessidade.

Figura 5 - Sistema On-Grid



Fonte: O autor, 2025.

2.2 Componentes Integrantes dos Painéis Solares

Os componentes que integram os painéis solares são vidro, alumínio, silício, EVA (plástico), cobre, prata, chumbo/cádmio. São eles os componentes principais da estrutura física dos painéis solares.

Na tabela 1 temos os principais componentes que constituem as placas solares. Os materiais são apresentados de acordo com suas proporções. Sendo eles:

- O vidro sendo o material mais predominante (70 a 80 %);
- O alumínio com (10 a 15 %)
- O silício (3 a 5%) sendo ele o material essencial para conversão de luz solar para energia
- O EVA utilizado no material encapsulante com (3 a 5%)
- Uma representação do cobre de 1% (condutores)
- Uma representação do cobre de 0,1% (condutores)
- Traços de chumbo/Cádmio (soldas e outros componentes)

Tabela 1 - Componentes Integrantes dos Painéis Solares

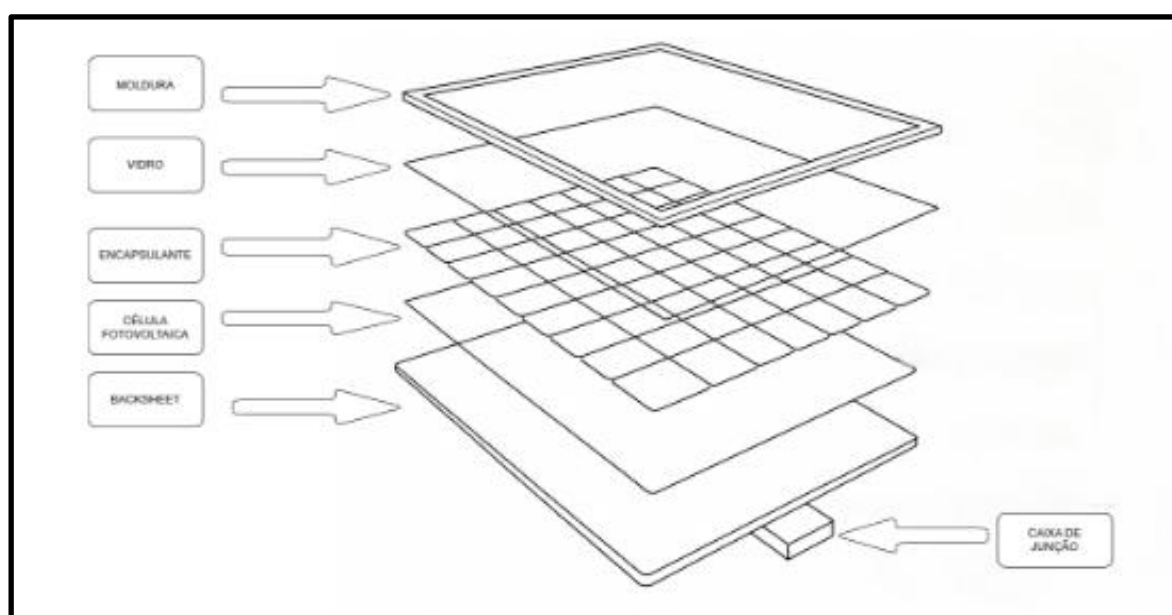
Componente	Proporção (%)
Vidro	70% – 80%
Alumínio	10% – 15%
Silício	3% – 5%
EVA (plástico)	3% – 5%
Cobre	< 1%
Prata	< 0,1%
Chumbo/Cádmio	Traços

Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

A figura 6 mostra, em vista explodida, a construção em camadas de um painel solar fotovoltaico. De cima para baixo, temos os seguintes itens:

- Moldura – Estrutura que protege e sustenta o painel;
- Vidro – Camada frontal transparente que protege contra impactos e intempéries;
- Encapsulante – Material que envolve as células solares, garantindo proteção e aderência;
- Célula Fotovoltaica – Componente que converte luz solar em eletricidade;
- Encapsulante (inferior) – Outra camada de proteção para as células;
- Backsheet – Camada traseira que isola eletricamente e protege contra umidade;
- Caixa de Junção – Onde os cabos são conectados para conduzir a energia gerada.

Figura 6 - Construção do Pannel Solar



Fonte: Adaptado de Portal Solar, 2025.

2.3 Geração de Silício

As placas solares de silício podem ser classificadas em três gerações, de acordo com a evolução tecnológica dos materiais e processos de fabricação. Cada geração apresenta características distintas quanto à eficiência, custo, aplicação e impacto ambiental. A tabela 2 apresenta as características de cada geração.

Tabela 2 - Características das Gerações das Placas de Silício

Geração	Tipo de Célula	Eficiência Média	Características
---------	----------------	------------------	-----------------

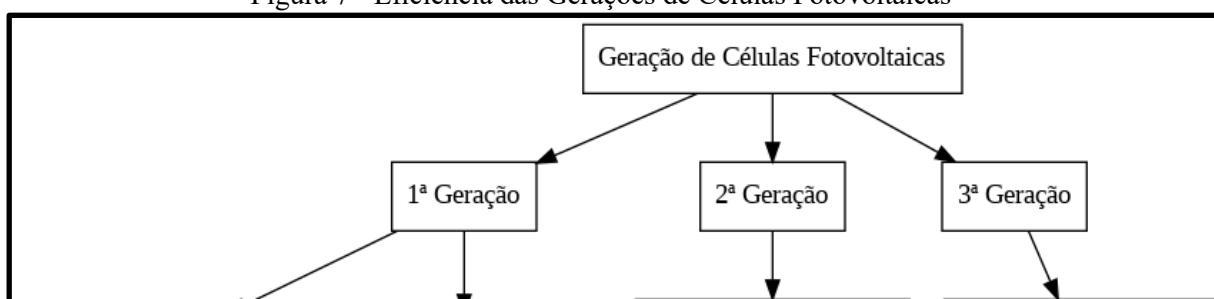
1 ^a	Si Monocristalino	18% – 22%	Alta eficiência, custo elevado, aparência preta uniforme.
1 ^a	Si Policristalino	15% – 18%	Custo mais baixo, eficiência um pouco menor, aparência azulada e granulada.
2 ^a	Filmes Finos (a-Si, CdTe, CIGS)	10% – 13%	Flexíveis, leves, menor custo de produção, ideais para grandes áreas ou superfícies irregulares.
3 ^a	Perovskita e Orgânicas, etc.	> 25% (em laboratório)	Tecnologias emergentes, potencial de alta eficiência e baixo custo, ainda em fase de testes.

Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

A figura 7 apresenta de forma gráfica a eficiência da Primeira, Segunda e Terceira Geração de Células Fotovoltaicas em porcentagem e apresenta sua eficiência média mínima e máxima.

- Primeira Geração: Compostas por silício cristalino, em monocristalino e policristalino; utiliza-se principalmente para fins comerciais. Possuem alta eficiência, variando entre 15% e 22%, longa vida útil, melhor ponto positivo, entretanto, mais complicada devido a custos de produção (IRENA, 2020).
- Segunda Geração: Dependentes de filmes finos de materiais, como silício amorfo, telureto de cádmio e ligas CIGS (cobre, índio, gálio e selênio) utilizando como material de fotovoltaica; sua eficiência é menor, de 10% a 13%, contudo, é mais leve, flexível e barato, ideal para uso em áreas específicas para (Fraunhofer ISE, 2022).
- Terceira Geração: Está em desenvolvimento constituído de células de perovskita e solares orgânicos que promovem ao eliminarem as limitações adotadas pelas primeiras gerações; está em pesquisa e teste para garantir a estabilidade, longa vida útil (NREL, 2023).

Figura 7 - Eficiência das Gerações de Células Fotovoltaicas



Fonte: O autor, 2025.

2.4 Degradação de Painéis Solares: Causas e Impactos na Eficiência

Segundo (CUNHA et al., 2023), a degradação dos módulos que compõem as placas fotovoltaicas trata-se de um processo natural que leva a perda de forma progressiva da capacidade de conversão de energia solar em eletricidade ao longo do tempo. Isso ocorre mesmo operando em condições normais de funcionamento e é agravado com a exposição ao ambiente tropical. De acordo com estudos, a taxa média de degradação anual dos módulos de silício cristalino em regiões de clima quente e úmido varia entre 0,5% e 1% ao ano. Essas perdas graduais podem ter origens pelos fatores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores de degradação dos Painéis Solares

Fator	Efeitos	Consequências
Radiação ultravioleta	Degradação dos encapsulantes	Redução da transparência e eficiência
Variações térmicas	Dilatação e contração dos materiais	Microfissuras e falhas estruturais
Umidade e oxidação	Corrosão de contatos metálicos	Perda de condutividade e falhas elétricas
Poeira e sujeira (soiling)	Bloqueio da luz incidente	Formação de hotspots e aquecimento local
Envelhecimento químico	Degradação de EVA e materiais adesivos	Delaminação e falhas de isolamento

Fonte: Adaptado de CUNHA et al., 2023.

O acúmulo de sujeira sobre os módulos, conhecido como soiling, também pode reduzir consideravelmente a eficiência dos sistemas, chegando a perdas de até 15% em algumas regiões (SILVA, 2016). A manutenção regular e o uso de materiais mais resistentes contribuem para prolongar a vida útil e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

2.5 Legislação Brasileira e a Logística Reversa de Painéis Solares

O rápido crescimento da energia solar no Brasil tem feito a logística reversa de painéis solares ser trazida ao debate no país e visando achar uma destinação correta de tais equipamentos ao fim de suas vidas úteis. A logística reversa, que deve ter legislações claras nos âmbitos nacionais, estaduais e municipais, é o foco de diversos projetos de lei (BRASIL, 2010; BRASIL, 2022).

2.5.1 Base Legal e Propostas Legislativas

O principal marco legal de resíduos sólidos em vigor no Brasil é a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, cujos objetivos envolvem o princípio de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, e que, em alguns casos, já resultou em sistemas de logística reversa obrigatórios. Em relação à mencionada diretriz, já haveria base para a criação de novos regulamentos específicos de produtos (BRASIL, 2010).

2.5.2 Desafios da Implementação

Com relação a implementação real da logística reversa, provavelmente haveria vários desafios relevantes, entre eles:

Alto grau de complexidade logística: tendo em vista as limitações de infraestrutura de coleta e transporte em regiões rurais e distantes, é inviável tecnicamente viabilizar um sistema de coleta e transporte eficaz;

O Risco do Trabalho Precarizado: a negligência contra as boas práticas a respeito da desmontagem dos painéis representará um risco para a preponderância dos envolvidos. Se ocorrer vazamentos de compostos tóxicos, a saúde do meio ambiente e do ser humano será ameaçada, com a precarização, mais uma vez, operando como um dado preocupante; se a mão-de-obra empregada não for suficiente qualificada, muitos trabalhadores estarão sujeito aos riscos diretos desta atividade (SILVA et al., 2021);

Custos de operação: os investimentos demandados para criar a estrutura de logística reversa, como centros de coleta e plantas de reciclagem, ainda são muito elevados e carecem de incentivos governamentais (BRASIL, 2024).

2.5.3 Perspectivas e Próximos Passos

O desenvolvimento da logística reversa de painéis solares no Brasil deve se fundamentar em três dimensões:

Legislação específica: é fundamental a aprovação dos projetos de lei em trâmite e das regulamentações propostas, que criarão um ordenamento jurídico claro, com metas, obrigações e sanções, os quais criam um ambiente institucional no qual a logística reversa seja mais barata que a dispersão do lixo;

Monitoramento e avaliação sistemáticos: a eficácia da medida deve ser monitorada por meio do uso de indicadores ambientais e de relatórios regulares, que permitirão ajustes e aprimoramentos ao longo do tempo (FERREIRA; OLIVEIRA, 2023).

Inovação: a invenção de tecnologias capazes de desmontar, separar e reciclar os componentes dos painéis solares será necessária para viabilizar economicamente o processo (SILVA et al., 2021).

2.6 Reutilização das Células de Silício

Ao fim da vida útil dos painéis solares as células de silício podem ser reutilizadas para outros fins podendo ser novamente empregadas em placas fotovoltaicas.

A reciclagem de módulos fotovoltaicos permite a recuperação de materiais valiosos, como o silício, que pode ser reutilizado na fabricação de novas células solares após processos específicos de purificação (DIAS, 2015). O fluxograma simplificado da figura 8 descreve o ciclo de reciclagem das células de silício iniciando já na extração das células após a coleta dos materiais descartados.

Figura 8 - Ciclo de reciclagem das Células de Silício



Fonte: O autor, 2025.

O ciclo de vida das células de silício começa com a extração da sílica, geralmente feita da areia. Em seguida, o material é purificado até o grau metalúrgico e, posteriormente, transformado em lâminas que ainda serão utilizadas na produção das células solares. Essas células, por sua vez, são encapsuladas e montadas em módulos fotovoltaicos prontos para aplicação em sistemas de instalação de energia solar.

Sua vida útil média é entre 25 e 30 anos. No entanto, a maioria dos painéis é descartada antes desse período, em função de danos de caráter físico, devido ao acaso ou obsolescência tecnológica, onde perdem eficiência diante da nova geração modelos em comparação com o mais antigo, (CAMPOS, 2020). Quando descartados, os painéis podem ser coletados através de programas de logística reversa que os encaminham para processos de separação e de desmontagem de seus componentes, como papel com vidro, plásticos, metais e as células de silício.

As lâminas danificadas são jogadas em novos processos de refino que possibilitam a recuperação do silício que posteriormente são usados em novas placas fotovoltaicas.

3. METODOLOGIA

3.1 Abordagem Metodológica

Foi adotada uma metodologia qualitativa de caráter exploratório, por meio de um estudo de caso, propriamente dito, cujo objetivo foi entender e verificar os impactos na implantação e descarte de placas solares e reutilização de seus componentes.

3.2 Revisão Bibliográfica

Inicialmente, foi efetuada a revisão bibliográfica para a construção da base teórica do tema aplicado. Foram levantadas as fontes acadêmicas relevantes, tais como artigos científicos, livros, documentação acadêmica online obtida em bases de dados eletrônicas, entre outras. Enfatizou-se o avanço na compreensão de algumas definições e conceitos relativos aos impactos ambientais, sociais e econômicos da energia solar.

3.3 Coleta de Dados

Foram definidos os métodos e ferramentas para a coleta de dados, considerando o escopo e os limites da pesquisa. Foram empregados recursos tecnológicos, como computadores, internet e ferramentas de edição de texto, com destaque para o uso do Microsoft Word e Google Docs para organizar e analisar as informações coletadas. As fontes de pesquisa online incluíram o Portal de Periódicos Capes, IRENA, ResearchGate, Google Acadêmico, a plataforma SciELO e a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo.

3.4 Análise de Dados

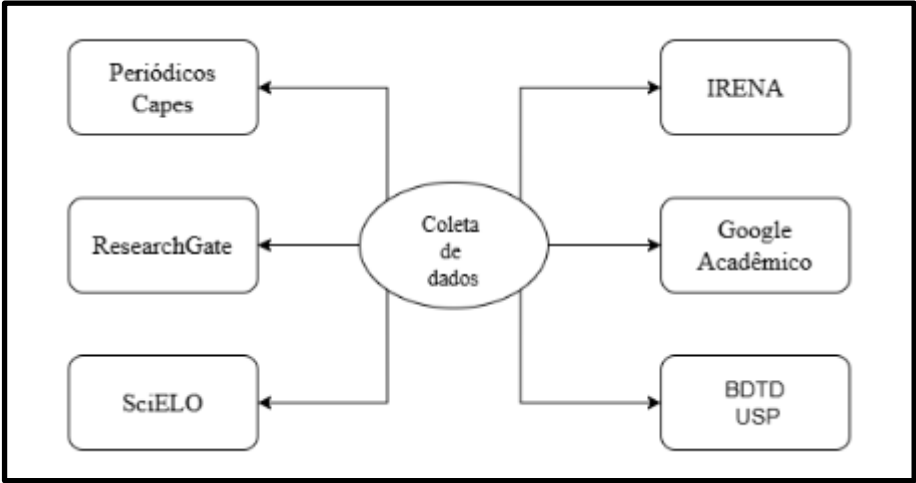
A análise dos dados foi conduzida de forma sistemática, visando à qualidade da pesquisa e sua fundamentação teórica, o que possibilitou uma compreensão abrangente do impacto na implementação e descarte de placas solares, mesmo que a presença real dos dados tenha dependido de etapas posteriores da pesquisa.

3.4.1 Apresentação de áreas de reuso das células fotovoltaicas

A pesquisa levantou áreas de reutilização das células de silício derivadas de painéis solares danificados e destinados ao descarte, destacando, dentre esses campos de reutilização, projetos de pequeno porte.

As fontes utilizadas para embasar o estudo estão reunidas e organizadas na Figura 9, onde são apresentadas de forma clara e objetiva, facilitando a compreensão e a consulta dos principais referenciais adotados na pesquisa.

Figura 9 - Fontes de Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo o autor, 2025.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados das revisões de literatura realizadas durante a pesquisa. As informações serão organizadas em tabelas, gráficos, diagramas e descrição textual.

A análise tem por foco mostrar estatisticamente a crescente adesão ao uso de placas solares, as trocas devido à quebra ou melhoramento de tecnologia e por fim um demonstrativo de reaproveitamento do componente principal para uso em projetos de pequeno porte.

4.1 Demanda por placa solares

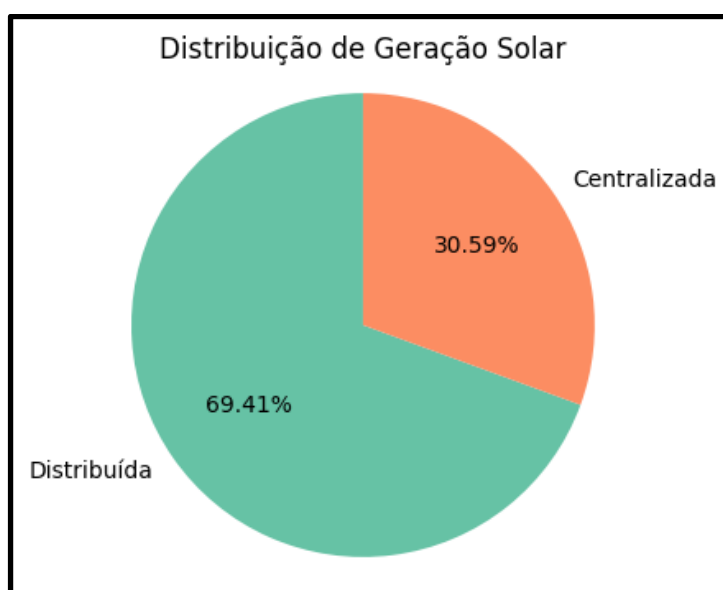
O avanço da implantação tem se acelerado, graças ao impulso de políticas de incentivos voltados à redução de custos, e as possibilidades nos mercados emergentes, como indústrias, comércios e residências.

Os dados da figura 9 mostram a distribuição entre geração distribuída e centralizada, a evolução de empregos e investimentos, a contribuição dos estados com maior potência solar instalada.

- **Distribuição entre geração distribuída e centralizada**

Uma breve análise da matriz solar nos mostra que a maior parte da distribuição do Brasil é feita por geração distribuída, isso representa 69,41% do total e refere-se a sistemas diretamente instalados em telhados de residências, indústrias e comércios. Por sua vez, as centralizadas correspondem a grandes usinas solares conectadas ao 10 sistema nacional com a parcela de 30,59%.

Figura 10 - Distribuição da energia solar nos últimos 10 anos.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

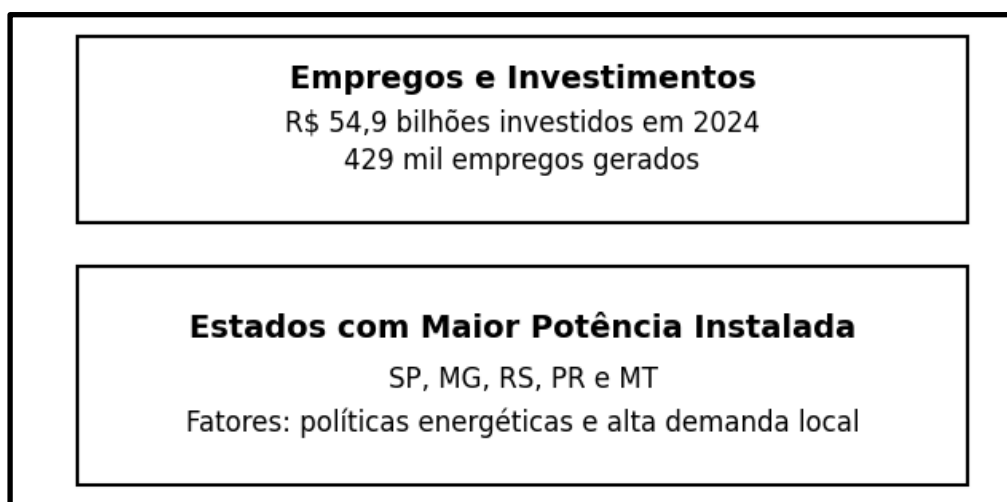
- **Evolução de empregos e investimentos**

Em 2024 o setor de energia solar cresceu de forma expressiva, chegando a captar cerca de 54,9 bilhões em investimentos, o que gerou 429 mil vagas de emprego impactando de forma positiva a economia.

- **Contribuição dos Estados com Maior Potência Instalada**

Os estados que se destacam como maiores contribuidores no que se refere a potência instalada são; São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso. Devido ao impulso de políticas energéticas, altas demandas residenciais, comerciais e industriais.

Figura 11 - Empregos e Investimentos - Potência Instalada.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

- **Taxa de descarte de painéis solares**

Com o aumento da tecnologia fotovoltaica no mercado, também aumenta o número de resíduos descartados ao fim da vida útil dos painéis, seja por quebra, desgastes ou melhora de tecnologias.

A tabela 4 mostra os números da proporção aproximada de cada componente em um painel solar típico. O vidro representa a maior parte do painel, entre 70% e 80%, mostrando que a maior parte do material é um elemento inerte e relativamente seguro, mas que gera volume considerável de resíduos. O alumínio, com 10% a 15%, é o segundo material mais presente, essencial para a estrutura, e embora reciclável, sua produção inicial exige muita energia. Onde o silício, está entre 3% e 5%, e é o componente mais crítico para a geração de energia, apesar de sua baixa proporção, ele é valioso e reciclável. Um componente plástico, o EVA, com 3% a 5%, por ser um plástico que existe dificuldade na sua reciclagem e pode liberar substâncias tóxicas se descartado inadequadamente. Temos também o cobre e a prata, que estão presentes em quantidades inferiores a 1%, são metais valiosos e importantes para a condução elétrica, com alta taxa de reciclagem. Por fim, os traços de metais pesados como chumbo e cádmio, que

embora presentes em quantidades muito pequenas, possuem grande potencial de contaminação ambiental, o que exige cuidados especiais no descarte e reciclagem.

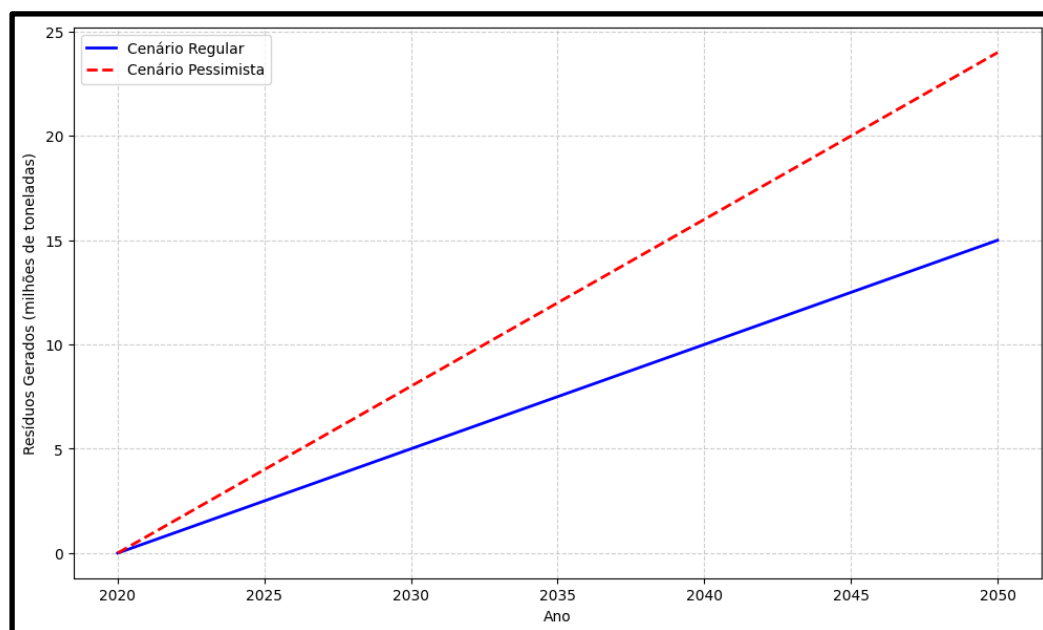
Tabela 4 - Simplificação de Resíduos de Painéis Fotovoltaicos.

Componente	Proporção (%)	Risco Ambiental	Reciclável?
Vidro	70% – 80%	Baixo (ocupa volume)	Sim
Alumínio	10% – 15%	Baixo (mas energia intensiva)	Sim
Silício	3% – 5%	Pode contaminar	Sim
EVA (plástico)	3% – 5%	Liberação de gases tóxicos	Parcialmente
Cobre	< 1%	Contamina solo e água	Sim
Prata	< 0,1%	Pouco risco, mas alto valor	Sim
Chumbo/Cádmio	Traços	Alta toxicidade	Sim

Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

A figura 12 apresenta uma projeção da geração de resíduos de 2020 até 2050, no gráfico do canto superior esquerdo temos dois cenários representados por duas curvas, uma regular e outra mais pessimista. Pois com os estudos nos campos da energia solar sendo intensificados, é natural o surgimento de novas tecnologias e assim o descarte de placas e componentes tende a aumentar de forma linear gerando resíduos. Assim, em ambos os cenários vai haver resíduos e o tratamento correto destes resíduos serão necessários.

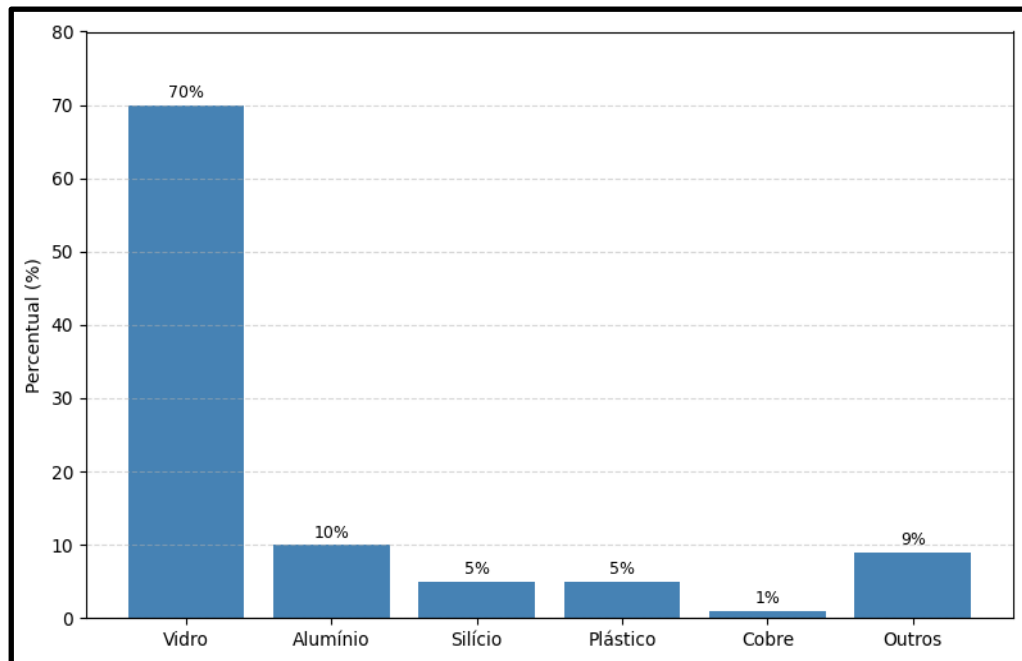
Figura 12 - Projeção de Geração de Resíduos Fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

Na figura 13 temos os indicadores da porcentagem dos principais materiais que compõem um painel solar, sendo o vidro o componente dominante, seguido por alumínio, silício e outros.

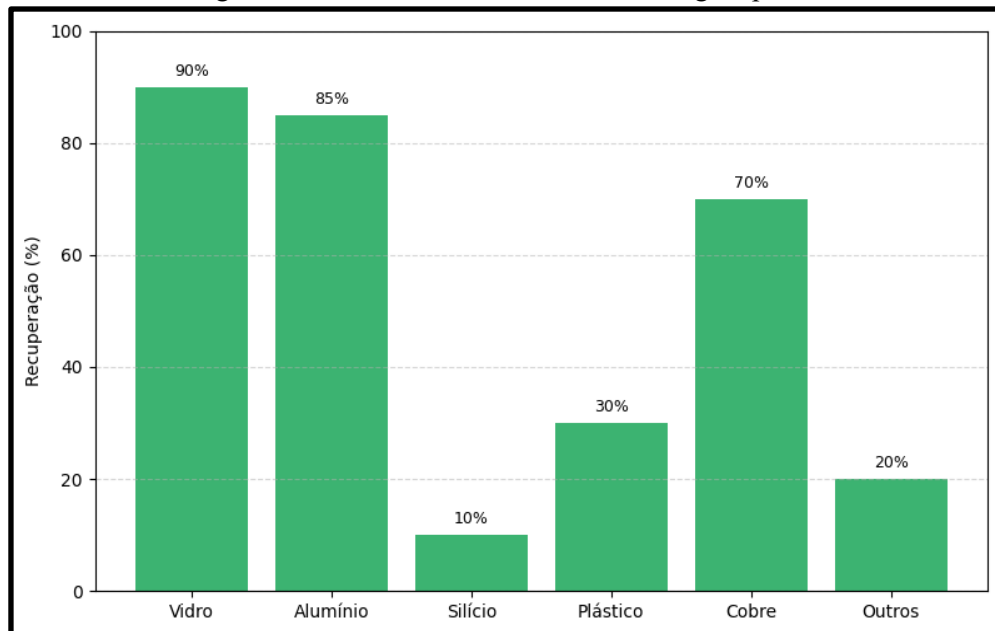
Figura 13 - Composição Média de um Painel Solar



Fonte: Adaptado de IRENA, 2025

Na figura 14 é apresentado a estimativa de recuperação dos materiais durante o processo de reciclagem com o vidro e alumínio com as maiores taxas de recuperação.

Figura 14 - Eficiência Estimada de Reciclagem por Material

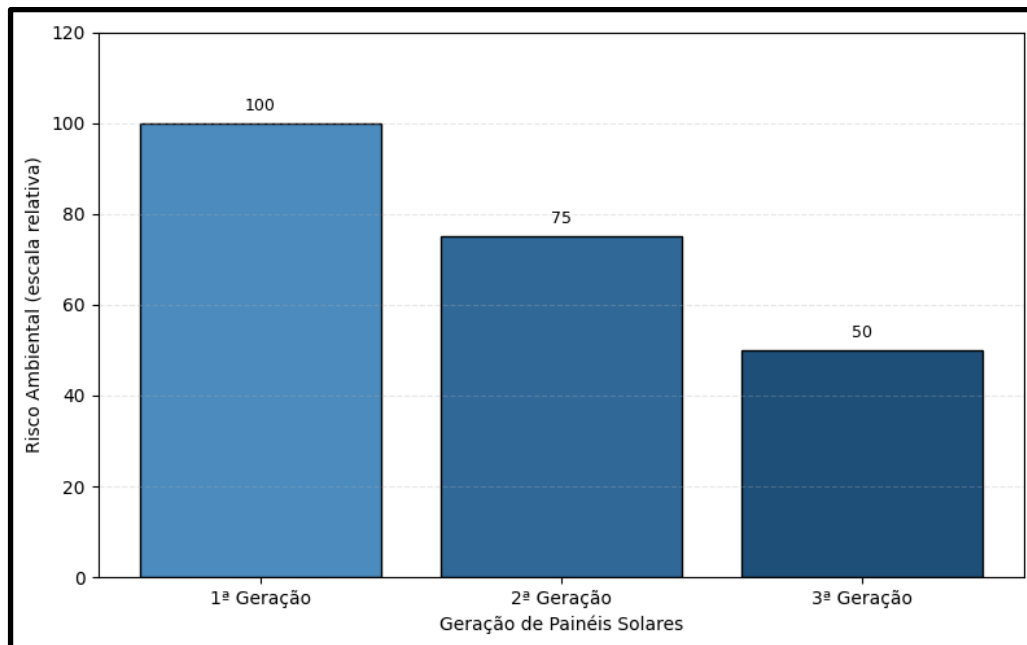


Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

Na figura 15 temos a comparação do risco ambiental entre diferentes gerações de painéis solares, mostrando uma redução progressiva do risco da 1ª para a 3ª geração. Observa-se uma tendência de diminuição do impacto ambiental da segunda geração em relação à primeira e da

terceira em relação à segunda, evidenciando a importância de investir em tecnologias cada vez mais limpas.

Figura 15 - Classificação de Risco Ambiental por Geração de Paineis



Fonte: Adaptado de IRENA, 2025.

4.2 Reutilização do Silício

Estima-se que a vida útil em média seja de cerca de 25 a 30 anos, contudo muitos equipamentos são descartados prematuramente devido a danos, perda de eficiência em comparação com novos modelos emergentes no mercado (CAMPOS,2020).

Para validar o estudo levantou-se cenários apresentando alternativas sustentáveis para o reaproveitamento e recuperação de células de silício danificadas, redirecionando-as para sistemas de baixa exigência energética, onde não existe demanda por alta eficiência energética para desempenhar o correto funcionamento.

Entre as principais aplicações podemos destacar:

- O seu uso na agricultura familiar na alimentação de sistemas simples de irrigação;
- Na iluminação de áreas rurais e urbanas, campos, praças, jardins;
- Em motores de portões, sensores em granjas;
- Sistemas de monitoramento e ventilação de estufas;
- Utilizar em carregadores solares para aparelhos eletrônicos.

Evidentemente, essas alternativas sustentáveis ganham demanda real em muitos territórios ao redor do mundo – por exemplo, há mais de 3,5 milhões de sistemas de

bombeamento solar instalados na Índia até 2022, onde são principalmente utilizados para irrigação de terras agrícolas (IRENA, 2022).

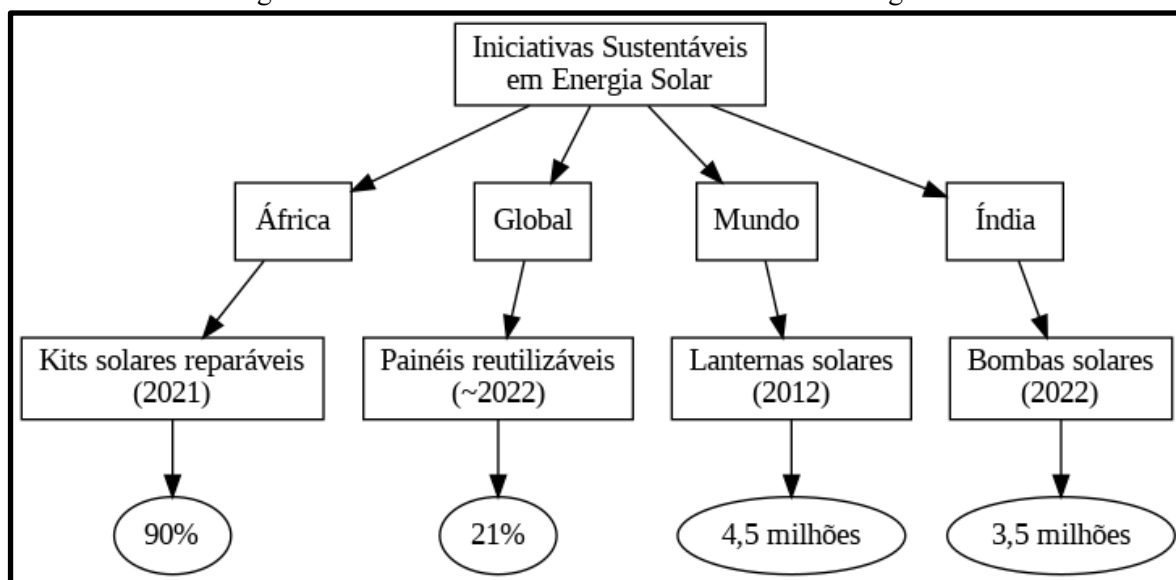
No setor de iluminação, mais de 4,6 milhões de lanternas solares foram distribuídas até o ano de 2012, demonstrando a possibilidade de usar essas alternativas em contextos de menor necessidade energética. (IEA, 2014).

Estudos ainda indicam que o reaproveitamento de painéis é uma alternativa promissora, considerando que 31% dos módulos descartados poderiam ser reparados antes de reciclados (SHARMA et al., 2022), e no continente africano, o reparo de até 90% dos kits solares analisados se mostram viáveis (SCHMIDT; HEEDE, 2021).

Desta forma, conclui-se que o reparo de células fotovoltaicas danificadas contribui com a redução dos resíduos utilizados e promove o acesso à energia renovável para populações em situação de vulnerabilidade.

A figura 16 apresenta um Panorama Global das Iniciativas Sustentáveis Relacionadas a Energia Solar nas quais são descritos os Kits solares reparáveis localmente (2021) e os Painéis Fotovoltaicos Reutilizáveis (2022).

Figura 16 - Iniciativas Sustentáveis Relacionadas a energia Solar



Fonte: Adaptado de IRENA (2022); IEA (2014); SHARMA et al. (2022); SCHMIDT; HEEDE (2021).

4.2.1 Projetos de Pequeno Porte com Placas Reutilizadas

A proposta inclui a criação de sistemas sustentáveis e de fácil acesso para implantação em regiões periféricas. Dentre os quais as alternativas mais viáveis são:

- Poste de iluminação solar para espaços públicos em comunidades rurais;

- Pontos de recarga solar para tablets e celulares em escolas, bibliotecas e pontos de ônibus e postos de saúde na zona rural;
- Sistemas de bombeamento de água movidos a bateria solar;
- Oficinas de capacitação técnicas, práticas em laboratório e estudo dos componentes.

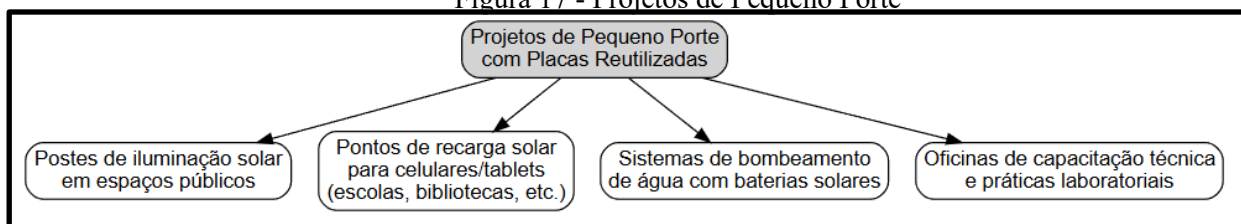
A viabilidade deste projeto pode ser aumentada por meio de parcerias com cooperativas e instituições de ensino federais e privadas. Todo o processo descrito anteriormente se dá por meio do fluxograma da imagem na Figura 17, em que descreve o ciclo de reutilização as placas de silício

A reutilização de módulos fotovoltaicos em pequeno porte, promove economia de recursos e incentivo à sustentabilidade em regiões de baixa infraestrutura energética, segundo a Agência Internacional de Energia Renovável, a reutilizar uma tonelada de painéis pode equivaler a 35 kg de silício de cursos recicláveis (EIA, 2021).

A partir de uma possibilidade de 10 mil toneladas de lixo do setor fotovoltaico que o Brasil poderia gerar até 2030 de acordo com o IRENA o kg para reaproveitamento de aproximadamente 1000 toneladas de materiais diferentes, evitando a criação de só 12 mil toneladas de CO₂, levando também em conta o que poderia ter sido economizado em energia com a economia de fabricar novos componentes.

Valor econômico sólido, Um sistema renovável eficiente de iluminação nas principais vias de comunidades rurais brasileiras poderia representar um valor econômico sólido. Conforme dados do Fraunhofer ISE, a implementação de módulos reaproveitados, com custo médio de US\$195, permitiria uma economia de cerca de 40% em relação ao uso de módulos novos.

Figura 17 - Projetos de Pequeno Porte



Fonte: O autor, 2025.

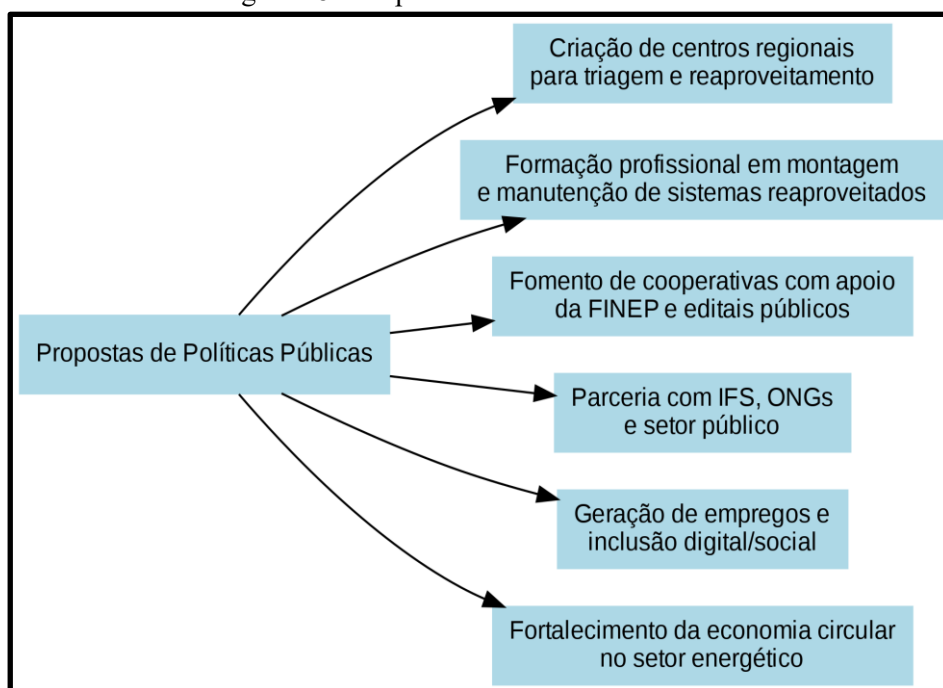
4.2.3 Propostas de Implementação de Políticas Públicas

Já que nossa solução apresentou viabilidade técnica e econômica para a reutilização de módulos fotovoltaicos, afirma-se a necessidade de criação de iniciativas públicas para recolhimento, avaliação e triagem das placas solares desapropriadas. A ação poderia ser realizada de forma, em parceria com os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia e ONGs, criando centros regionalizados de recuperação.

E além do menor impacto ambiental, resultam setores-piloto como polos produtores de formação técnica, ofertando formação profissional contínua para jovens e adultos, em situação de vulnerabilidade social, com curso de montagem, manutenção e aplicação em sistemas solares reaproveitados. Assim aumentando não somente a sustentabilidade ambiental, mas social e digital.

Com incentivo de fundos, a criação de cooperativas locais com apoio de editais públicos e FINEP poderia movimentar a economia circular no ramo energético, promovendo uma transição mais justa e sustentável para o meio ambiente.

Figura 18 - Propostas de Políticas Públicas



Fonte: O autor, 2025.

5. CONCLUSÃO

Este estudo buscou identificar os impactos ambientais resultantes do setor de instalação e descarte das placas solares no Brasil, centrando-se na exposição dos perigos gerados pelo acúmulo de resíduos de placas fotovoltaicas com o atual crescimento do mercado fotovoltaico. O estudo demonstra o papel dos painéis como elemento-chave para uma energia mais limpa, mas evidencia um ligeiro deslize nos aspectos do descarte.

Temos que a reutilização das células de silício pode ser uma opção limpa, especificamente ao se orientar para o ramo de obra social, com pequenos sistemas em áreas de iluminação, irrigação e recarga dos dispositivos eletrônicos. As aplicações anteriores reduzem os danos ambientais e promovem a energia inclusiva na situação de áreas onde não se dispõe de infraestrutura.

Pode-se afirmar que, estas ações que se dedicam à reutilização ou ao reaproveitamento dos componentes dos painéis solares, entre eles o principal componente, as células de silício, são necessárias para maximizar benefícios da energia solar a reduzir as consequências colaterais para sua expansão. Nesse sentido, políticas incentivadoras, recursos financeiros ao desenvolvimento da pesquisa e parceria com institutos didáticos e cooperativas são estratégias básicas para assegurar a sustentabilidade aplicada aos apelos do setor fotovoltaico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (IRENA). **IRENA – International Renewable Energy Agency**. Disponível em: <https://www.irena.org/>. Acesso em: 25 jan. 2025.

BIANCONI, Jessyk Daiana. Renováveis com consequência: o passivo ambiental em comunidades vulneráveis no Nordeste Brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIREITOS HUMANOS DE COIMBRA, 2024, Coimbra. **Anais...** Coimbra, 2024.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12305-2-agosto-2010-607598-norma-pl.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRASIL. Projeto de Lei nº 9.528/2018. Dispõe sobre a logística reversa de painéis fotovoltaicos e componentes. **Câmara dos Deputados**, Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2197023>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório de Sustentabilidade e Política Nacional de Resíduos Sólidos – 2024**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/residuos-solidos-urbanos>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CAPES. **Portal de Periódicos**. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: jan. 2025.

CRUZ, Fernanda Tátia et al. Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 73294-73309, 2020.

DE ARAÚJO CAVALCANTE, Maycon et al. Os impactos da tecnologia de energia solar On-Grid e Off-Grid para o meio ambiente e seus aspectos positivos. **E-Acadêmica**, v. 3, n. 3, p. e6433382-e6433382, 2022.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/127924>. Acesso em: 25 maio 2025.

DINIZ, Marco Antônio Pompílio. **Descarte de painéis solares no contexto de consolidação do mercado fotovoltaico brasileiro e mundial**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 12 mar. 2023.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Célula Fotovoltaica: Tudo que você precisa saber.** Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 8 fev. 2025.

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

FERREIRA, C.; OLIVEIRA, T. Indicadores ambientais e logística reversa no setor fotovoltaico brasileiro. **Revista Brasileira de Sustentabilidade e Energia**, v. 12, n. 1, p. 58-73, 2023.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. **Photovoltaics Report**. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>. Acesso em: 25 maio 2025.

IEA. **Solar Energy Perspectives**. International Energy Agency, 2014.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2020**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. Acesso em: 25 maio 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Perovskite Photovoltaics Research**. Golden, CO: NREL, 2023. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/perovskite-solar-cells>. Acesso em: 25 maio 2025.

PORTAL SOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SCHMIDT, T.; HEEDE, S. Repairability of Solar Home Systems in Rural Africa. **Energy for Sustainable Development**, 2021.

SHARMA, P. et al. Recycling of photovoltaic modules: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2022.

SILVA, J. R. et al. Desafios da logística reversa de painéis solares no Brasil. **Cadernos de Gestão Ambiental**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 245-263, 2021.



CÓPIA DO TRABALHO Nº VERSÃO FINAL DO TCC - Daniel Luiz de Souza/2025 - DFGNP (11.62.03)
(Nº do Documento: 156)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 15:21)

BRUNO SENNA CORREA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DFGNP (11.62.03)

Matrícula: ###244#1

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **156**, ano: **2025**, tipo:
CÓPIA DO TRABALHO, data de emissão: **25/07/2025** e o código de verificação: **9e289cfd64**