



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

RACHEL BEZERRA

**VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UM ESTUDO
SOBRE DIFERENTES TECNOLOGIAS**

Recife

2025

RACHEL BEZERRA

**VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UM ESTUDO
SOBRE DIFERENTES TECNOLOGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Recife

2025

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

Bezerra, Rachel.

Viabilidade da reciclagem de módulos fotovoltaicos: um estudo sobre diferentes tecnologias / Rachel Bezerra. - Recife, 2025.

74 p. : il., tab.

Orientador(a): Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

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

Inclui referências.

1. módulos fotovoltaicos. 2. reciclagem. 3. célula solar. 4. recuperação. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RACHEL BEZERRA

**VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UM ESTUDO
SOBRE DIFERENTES TECNOLOGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 15/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Davidson da Costa Marques (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Resumo

Diante da necessidade do uso de energias limpas, que sejam sustentáveis e não emitam gases, a energia solar fotovoltaica vem se destacando mundialmente, com crescimentos significativos em capacidade instalada. A partir disso, surge a preocupação de como gerir os resíduos fotovoltaicos, visto que os materiais que compõem os módulos são preciosos, raros ou perigosos ao meio ambiente. A reciclagem se apresenta como uma solução, embora sua viabilidade varie conforme a tecnologia dos módulos. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica e ambiental dos processos de reciclagem disponíveis, bem como os desafios associados a cada tecnologia. Para isso, foram analisados dados disponíveis na literatura sobre os processos, incluindo testes laboratoriais que indicam os materiais recuperados, os custos envolvidos e as receitas obtidas. O módulo de silício cristalino, predominante no mercado, apresentou viabilidade tanto econômica quanto ambiental. Já as demais tecnologias analisadas apresentam limitações, mas com o avanço de pesquisas e testes, poderão se tornar alternativas mais sustentáveis no futuro.

Palavras-chaves: módulos fotovoltaicos; reciclagem; célula solar; recuperação.

Abstract

Given the need to use clean, sustainable and non-emissive energy sources, solar photovoltaic energy has been gaining prominence worldwide, with significant growth in installed capacity. This has led to concerns about how to manage photovoltaic waste, since the materials that make up the modules are precious, rare or hazardous to the environment. Recycling emerges as a solution, although its feasibility varies depending on the module technology. This work aims to analyze the economic and environmental feasibility of available recycling processes, as well as the challenges associated with each technology. To this end, data available in the literature on the processes were analyzed, including laboratory tests that indicate the recovered materials, the costs involved and the revenue obtained. The crystalline silicon module, which dominates the market, showed both economic and environmental feasibility. The other technologies analyzed have limitations, but with the advancement of research and testing, they may become more sustainable alternatives in the future.

Keywords: photovoltaic modules; recycling; solar cell; recovery.

Lista de Figuras

Figura 1 – Capacidade Instalada nos principais países.	12
Figura 2 – Estimativa do volume de resíduos fotovoltaicos.	13
Figura 3 – Componentes do módulo fotovoltaico.	16
Figura 4 – Junção pn na célula solar.	18
Figura 5 – Ligação em paralelo.	19
Figura 6 – Ligação em série.	20
Figura 7 – Processo de produção.	21
Figura 8 – Célula Monocristalina e Policristalina.	21
Figura 9 – Produção anual dos módulos de primeira e segunda geração.	22
Figura 10 – Espessura e queda do consumo de polissilício.	22
Figura 11 – Produção do lingote de m-si.	23
Figura 12 – Participação de mercado dos filmes finos no mercado total.	24
Figura 13 – Célula de Silício Amorfo.	25
Figura 14 – Célula de CdTe.	26
Figura 15 – Célula de CIGS.	27
Figura 16 – Estrutura da DSSC.	28
Figura 17 – Funcionamento da DSSC.	29
Figura 18 – Estrutura da célula BHJ.	30
Figura 19 – Estrutura cristalina da Célula Solar de Perovskita (PSC).	31
Figura 20 – Estrutura da célula de perovskita.	32
Figura 21 – Diagrama do processo de reciclagem do módulo fotovoltaico.	35
Figura 22 – Esquema do processo de reciclagem.	36
Figura 23 – Emissões e energia cumulativa.	41
Figura 24 – Análise econômica da reciclagem.	52
Figura 25 – Evolução da potência instalada no Brasil.	55
Figura 26 – Expansão em capacidade da MMGD no Brasil.	55
Figura 27 – Estimativa anual de resíduos fotovoltaicos no Brasil.	60
Figura 28 – Estimativa de resíduos fotovoltaicos acumulados no Brasil.	60
Figura 29 – Emissões geradas por módulos no fim de vida.	63
Figura 30 – Comparação de custos entre materiais virgens e recuperados.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição de Módulos de c-Si.	34
Tabela 2 – Tratamento Físico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.	36
Tabela 3 – Tratamento Térmico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.	36
Tabela 4 – Tratamento Químico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.	37
Tabela 5 – Recuperação do Silício.	38
Tabela 6 – Casos para análise da reciclagem.	40
Tabela 7 – Estimativa do custo da reciclagem.	45
Tabela 8 – Parâmetros Weibull e Proporção de módulos.	58
Tabela 9 – Capacidade instalada no Brasil (MW).	59
Tabela 10 – Relação peso-potência.	60
Tabela 11 – Análise econômica da reciclagem (valores em US\$/m ²).	61
Tabela 12 – Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem no Brasil.	65

Lista de abreviaturas e siglas

a-Si	Silício Amorfo
BHJ	<i>Bulk Heterojunction</i>
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Seleneto de Cobre Índio Gálio
c-Si	Silício Cristalino
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cells</i>
ETL	<i>Electron Transport Layer</i>
EVA	Acetato-vinilo de Etileno
FTO	Óxido de Estanho dopado com Flúor
GC	Geração Centralizada
HTL	<i>Hole Transport Layer</i>
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
ITO	Óxido de Índio e Estanho
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
Mo	Molibdênio
m-Si	Silício Monocristalino
OSC	Células Solares Orgânicas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
p-Si	Silício Policristalino
PSC	Célula Solar de Perovskita
TCO	Óxido Condutor Transparente
WAC	Resina Catiônica de Ácido Fraco

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Problemática	12
1.3	Objetivos	14
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	14
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	14
1.4	Organização do trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Componentes do módulo fotovoltaico	16
2.1.1	<i>Célula Solar</i>	17
2.1.2	<i>Moldura</i>	18
2.1.3	<i>Vidro Fotovoltaico</i>	18
2.1.4	<i>Filme Encapsulante</i>	18
2.1.5	<i>Backsheet</i>	19
2.1.6	<i>Caixa de Junção</i>	19
2.2	Tipos de Módulos Fotovoltaicos	20
2.2.1	<i>Primeira Geração</i>	20
2.2.1.1	<i>Célula de Silício Monocristalino (m-Si)</i>	23
2.2.1.2	<i>Célula de Silício Policristalino (p-Si)</i>	23
2.2.2	<i>Segunda Geração</i>	24
2.2.2.1	<i>Célula de Silício Amorfo (a-Si)</i>	25
2.2.2.2	<i>Célula de Telureto de Cádmio (CdTe)</i>	26
2.2.2.3	<i>Célula de Seleneto de Cobre Índio Gálio (CIGS)</i>	26
2.2.3	<i>Terceira Geração</i>	27
2.2.3.1	<i>Célula sensibilizada por corante (DSSC)</i>	28
2.2.3.2	<i>Célula solar orgânica (OSC)</i>	29
2.2.3.3	<i>Célula solar de Perovskita (PSC)</i>	30
3	RECICLAGEM	33
3.1	Módulos de Silício Cristalino	33
3.1.1	<i>Processos de tratamento</i>	35

3.1.2	<i>Aspecto econômico</i>	39
3.1.3	<i>Aspecto ambiental</i>	40
3.2	Módulos de Silício Amorfo	42
3.3	Módulos de CdTe	43
3.3.1	<i>Aspecto econômico e ambiental</i>	44
3.4	Módulos de CIGS	46
3.4.1	<i>Aspecto econômico e ambiental</i>	48
3.5	Módulos de DSSC	49
3.6	Módulos de OSC	50
3.6.1	<i>Aspecto econômico</i>	51
3.7	Módulos de Perovskita	52
3.7.1	<i>Aspecto econômico e ambiental</i>	53
3.8	Panorama da Reciclagem no Brasil	54
3.8.1	<i>Legislação brasileira</i>	55
3.8.2	<i>Estimativa de descarte</i>	57
4	VIABILIDADE	61
4.1	Primeira geração	61
4.2	Segunda geração	62
4.2.1	<i>CdTe</i>	62
4.2.2	<i>CIGS</i>	63
4.3	Terceira geração	64
4.4	Cenário nacional	65
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69

1 Introdução

1.1 Contextualização

As energias limpas e renováveis estão sendo amplamente demandadas nos últimos anos, quando se torna evidente os problemas ambientais que envolvem a produção de energia elétrica através das fontes não renováveis como carvão, gás natural e petróleo. Há grande necessidade de fontes que são auto-sustentáveis, visto que os recursos naturais para as fontes não renováveis irão se extinguir num futuro próximo, por isso começaram a ser utilizadas as energias renováveis como eólica, biomassa, hidráulica, geotérmica, solar e maremotriz.

Em 2011, devido à alta incidência dos raios solares no local, foi instalada, no Ceará, a primeira usina fotovoltaica do Brasil com 4.680 módulos fotovoltaicos e capacidade de 1 megawatt (ENERGIA, 2020). Desde então, o mercado fotovoltaico e a geração de energia cresceram significativamente no Brasil, levando à implementação de grandes usinas, como o Complexo Solar Janaúba, inaugurado em 2023, com um total de 2,2 milhões de módulos fotovoltaicos e 1,2 GWp de capacidade de geração (ENERGIA, 2023).

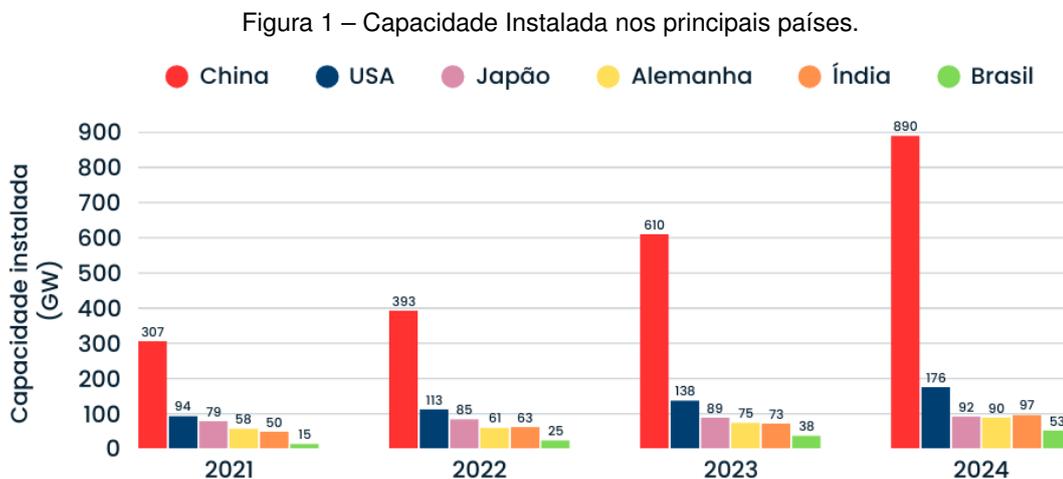
Em 2022 houve um notável aumento da participação dos sistemas fotovoltaicos na matriz energética do Brasil, saindo de 2% para 4,4%, devido a regulamentação da Lei 14.300/2022 (FEDERAL, 2022) (Lei da Energia Solar), considerada o Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída, que entrou em vigor em janeiro de 2023.

A lei da energia solar consiste em adicionar uma taxa, com o intuito de custear despesas relacionadas à rede elétrica, na geração dos sistemas fotovoltaicos instalados a partir de janeiro de 2023, logo várias empresas aproveitaram para instalar antes dessa data, causando esse aumento percentual na matriz energética. Quando há sobra de geração de energia do sistema fotovoltaico *on-grid* (sistema conectado à rede de distribuição), o consumidor recebe créditos de energia que são abatidos de sua conta de luz; após a regulamentação de 2023, esses créditos serão tarifados de forma progressiva, com percentuais crescentes a cada ano até 2028.

A capacidade instalada da energia solar fotovoltaica cresceu significativamente nos últimos anos. A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) fornece um relatório anual da capacidade instalada e conectada, tanto global quanto para cada país. De 2021 a 2024 a capacidade instalada global passou de 0,86 TW para 1,86 TW (IRENA, 2025).

Implicando que, nos últimos 4 anos, o crescimento da capacidade instalada foi maior do que a registrada desde o surgimento da tecnologia. A China se destaca com a maior contribuição nessa expansão, de 2023 para 2024 o país foi responsável por cerca de 61% do crescimento global (IRENA, 2025).

O Brasil também se destaca na produção de energia pelo sistema fotovoltaico. O país atualmente ocupa o sexto lugar, no ranking mundial de capacidade instalada de energia fotovoltaica. “A sexta colocação coloca o País em posição de destaque na geopolítica global de transição energética e é fruto dos cerca de 11,9 GW adicionados da fonte solar no ano de 2023”, informou a Absolar (ABSOLAR, 2024). O ranking é liderado pela China, em seguida Estados Unidos, Alemanha, Japão e Índia, a Figura 1 mostra a capacidade instalada desses seis países, de acordo com as informações da (IRENA, 2025). Em comparação com o Brasil, a incidência dos raios solares na Alemanha é muito menor, o pior lugar de incidência solar no Brasil consegue gerar mais energia elétrica do que o melhor lugar de incidência solar da Alemanha, mostrando o grande potencial do Brasil na produção de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de (IRENA, 2025).

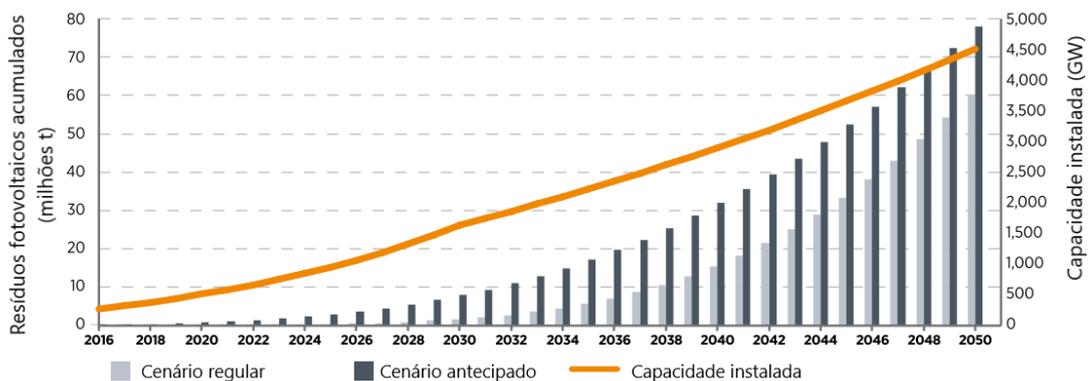
1.2 Problemática

A vida útil dos módulos fotovoltaicos é cerca de 25 anos, à medida que o mercado de energia fotovoltaica se expande também surge a necessidade de planejar o que fazer com os resíduos fotovoltaicos quando os módulos chegarem ao fim do seu período de vida útil. O descarte indevido pode causar problemas ambientais, os resíduos de metais pesa-

dos como cádmio e chumbo presentes nas células fotovoltaicas causam um grande risco ambiental, pois são tóxicos e podem causar a morte da fauna e flora. O não reaproveitamento de materiais presentes nos módulos, como vidro, alumínio e metais que constituem os semicondutores, como silício, índio, gálio, telúrio, são perdas econômicas que devem ser evitadas. Metais como gálio, índio e telúrio correm o risco de se extinguir, então sua reciclagem é de extrema importância.

Em um estudo de 2016, a IRENA estimou, em uma escala global, que 15 bilhões de dólares poderiam ser recuperados da reciclagem de módulos fotovoltaicos até 2050. Nesse estudo, estimou-se a capacidade instalada global até 2050, bem como o acúmulo de resíduos fotovoltaicos. Como mostra a Figura 2, estimou-se considerando o cenário regular, de 30 anos de vida para o módulo solar, e o cenário antecipado, no qual o módulo falha antes do tempo regular. A previsão para 2030, era uma capacidade instalada de 1,6 TW, com acúmulo de resíduos entre 1,7 a 8 milhões de toneladas; e, até 2050, 4,5 TW, com resíduos acumulados entre 60 a 78 milhões de toneladas. Atualmente, com o crescimento acelerado dessa tecnologia, a expectativa para 2030 já foi superada seis anos antes. Portanto, é esperado um maior volume de resíduos para os próximos vinte anos, salientando a urgência do descarte adequado e do reaproveitamento (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Figura 2 – Estimativa do volume de resíduos fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Ao reciclar os resíduos fotovoltaicos, eles podem ser reaproveitados para fabricar novos módulos fotovoltaicos. No entanto, a composição dos módulos varia de acordo com o tipo de célula solar, o que influencia no processo de reciclagem. Os tipos de células mais utilizadas são a de Silício Cristalino (c-Si), pois possuem maior eficiência, podendo ser monocristalino ou policristalino. Destacam-se também as células de filme fino, que possuem

uma eficiência menor que as de c-Si, e são constituídas por uma camada fina de semicondutor, comumente de Silício Amorfo (a-Si), Seleneto de Cobre Índio Gálio (CIGS) ou Telureto de Cádmio (CdTe).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade dos métodos de reciclagem aplicados aos diferentes tipos de módulos fotovoltaicos descartados, destacando os benefícios econômicos e ambientais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os métodos de reciclagens disponíveis, destacando suas limitações e vantagens;
- Avaliar o aspecto econômico dos processos de reciclagem para os diferentes tipos de módulos;
- Comparar, com base nos dados apresentados, a viabilidade econômica e ambiental do processo de reciclagem dos diferentes tipos de módulos fotovoltaicos;
- Apresentar a reciclagem no Brasil;
- Estimar a quantidade de módulos descartados no Brasil.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho é dividido em cinco Capítulos. Este primeiro busca contextualizar o cenário, constatando a importância do tema através de sua problemática.

O Capítulo 2 apresenta os elementos constituintes do módulo fotovoltaico, descreve o funcionamento da célula solar e especifica as gerações que são abordadas no trabalho. Este Capítulo fornece a fundamentação teórica para o entendimento dos processos que são discutidos no capítulo seguinte.

O Capítulo 3 trata da reciclagem dos módulos fotovoltaicos para os diferentes tipos de células. A pesquisa é descritiva baseada em fontes bibliográficas, como artigos científicos e livros publicados sobre o tema. A abordagem é quantitativa, baseada em resultados apresentados por diversos autores, após testes em laboratórios. Para cada tecnologia, foram selecionados estudos que trouxessem o aspecto econômico servindo como base para a análise da viabilidade. Além disso, é apresentado o impacto da reciclagem no aspecto ambiental, com foco no módulo de c-Si. Ressalta-se que outros estudos podem apresentar abordagens distintas, com diferentes dados e perspectivas.

No Capítulo 4, é feita uma análise da viabilidade do processo de reciclagem, considerando o contexto econômico e ambiental, onde são apresentadas suas limitações e vantagens.

Por fim, no Capítulo 5 são feitas as conclusões e interpretações do que foi apresentado no trabalho.

2 Fundamentação Teórica

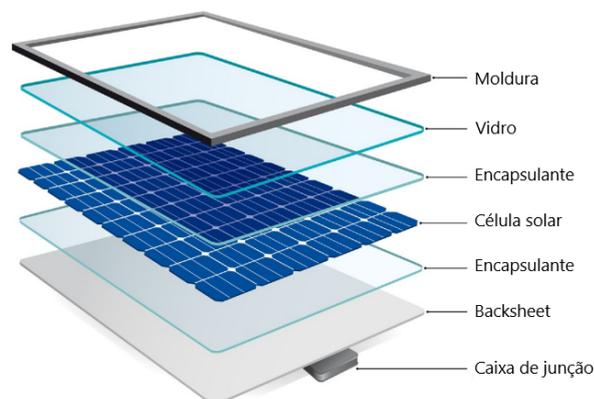
O módulo fotovoltaico é formado pelo conjunto de células solares, e essas são feitas de materiais semicondutores. Na tabela periódica os elementos químicos são classificados em gases nobres, metais, semimetais e não metais, os semicondutores são formados por átomos de semimetais como o Boro, Silício, Germânio, Arsênio, Antimônio, Telúrio e Polônio.

Os semimetais se formam quando íons de elementos se atraem eletrostaticamente formando ligações, quando os átomos interagem através dessas ligações, são formadas estruturas sólidas, essas, quando bem definidas, classificam o material como um sólido cristalino. Um material é classificado como sólido policristalino quando é formado pelo aglomerado de cristais e possuem regiões com alto grau de ordem. Os materiais utilizados em dispositivos semicondutores se estabelecem em uma estrutura cristalina, que é o agrupamento de átomos de forma ordenada, já um sólido não cristalino ou amorfo é formado por átomos que não formam um padrão definido.

2.1 Componentes do módulo fotovoltaico

Além das células fotovoltaicas, os módulos são constituídos por outros componentes que garantem seu funcionamento e durabilidade, sendo eles a moldura de alumínio, o vidro, o filme encapsulante, o *backsheet* e a caixa de junção. A Figura 3 ilustra os componentes que são abordados nesta seção.

Figura 3 – Componentes do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (SATPATHY; PAMURU, 2021c).

2.1.1 Célula Solar

Ao introduzir na estrutura de um semicondutor um elemento doador de elétron, chamado de dopante tipo n, cria-se a camada tipo n da célula, que estará com excesso de elétrons ou seja com uma carga negativa. No outro lado, se formará a camada tipo p ao introduzir um elemento, denominado dopante tipo p, que não terá elétrons suficientes para que a ligação com o semicondutor fique completa, dessa forma este lado estará com lacunas ou buracos por conta da ausência dos elétrons e uma carga positiva.

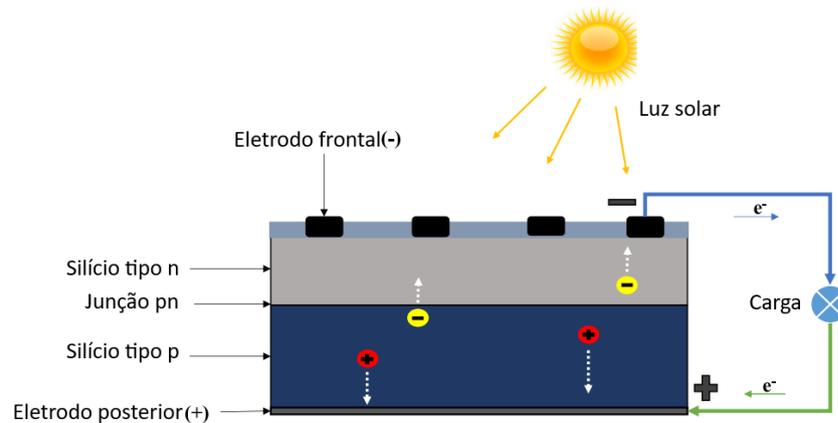
O processo que ocorre na junção pn, é a passagem dos elétrons livres da camada n para a p, de modo que, a região p fica negativamente carregada, pois ganhou elétrons, e a n fica positivamente carregada, pois perdeu elétrons. Ao alcançar um equilíbrio após a passagem dos elétrons livres, esse acúmulo de cargas cria um campo elétrico que impede mais elétrons de passarem pela junção. Quando a luz solar incide sobre a junção, os elétrons do material semicondutor recebem a energia dos fótons e ficam excitados, criando pares elétron-buraco. O campo elétrico, presente na junção, separa esses pares, de modo que os elétrons vão em direção à região tipo n, e o buraco para à região p (AL-ALI; OLABI; MAHMOUD, 2025). Em geral, os contatos frontal e posterior são constituídos de metais, e coletam os elétrons e buracos, atuando como eletrodos, sendo o cátodo o coletor de elétrons e o ânodo o coletor de buracos. Por conta da diferença de potencial, os elétrons saem, pelo cátodo, para o circuito externo em direção ao ânodo, originando a corrente contínua e descrevendo o processo do Efeito Fotovoltaico. O esquema da célula fotovoltaica está ilustrada na Figura 4. Faz-se necessário o uso de inversores para converter a corrente contínua para corrente alternada, que é a corrente encontrada na rede elétrica, nas linhas de transmissão, amplamente distribuída e utilizada nas residências.

Um dado muito importante sobre a célula solar é a sua eficiência, que representa o potencial de conversão da energia solar em energia elétrica. A eficiência (η) é calculada por:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \times 100\% \quad (2.1)$$

em que P_{MP} é a potência máxima do módulo em watt-pico, A é a área da célula (m^2) e G é a irradiância padrão de $1000W/m^2$ (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 4 – Junção pn na célula solar.



Fonte: Adaptado de (AL-ALI; OLABI; MAHMOUD, 2025).

2.1.2 Moldura

A moldura é feita com um alumínio anodizado, o elemento passa por um processo eletroquímico para que se torne mais durável. Sua principal função é proteger o módulo trazendo sustentação e não permitindo que se torça, causando danos às células (SOLAR, 2020).

2.1.3 Vidro Fotovoltaico

É um vidro ultra puro, possui um preço mais elevado que o vidro comum, por ser resistente a chuvas e granizo, além de ser fabricado com o intuito de deixar facilmente a luz passar e refletir o mínimo possível (SOLAR, 2020).

2.1.4 Filme Encapsulante

Constituído pelo Acetato-vinilo de Etileno (EVA), que é um polímero derivado do petróleo, a principal característica desse material é absorção de calor, além de ser a prova de água. Portanto o filme tem a função de proteger as células fotovoltaicas de temperaturas excessivas, da umidade e do envelhecimento causado pelos raios UV (SOLAR, 2020).

2.1.5 Backsheet

Backsheet ou camada traseira tem por função proteger as células fotovoltaicas do meio externo e fornecer isolamento elétrico. Possui a aparência de um filme branco e é constituído, em geral, por materiais plásticos resistentes (CAMPOS, 2023).

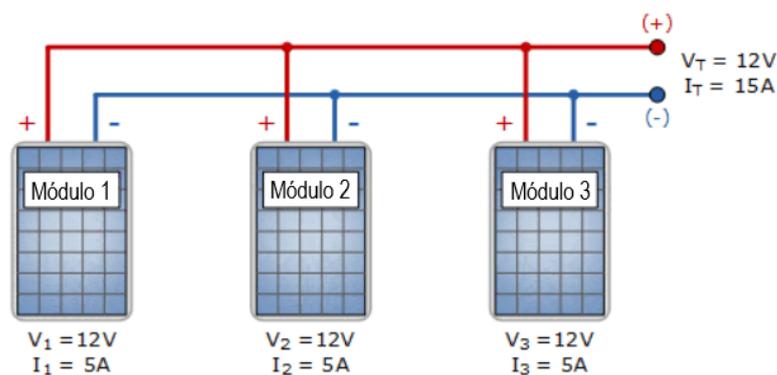
2.1.6 Caixa de Junção

A caixa de junção tem por função conectar os módulos fotovoltaicos, ela possui dois condutores (positivo e negativo), responsáveis por fazer essa conexão, que pode ser em paralelo ou série.

Em paralelo: Nessa ligação o sistema fotovoltaico tem como tensão de saída a tensão de um único módulo, enquanto a corrente de saída é a soma das correntes de cada módulo. Conectam-se todos os terminais positivos dos módulos entre si e, todos os terminais negativos entre si, como consta na Figura 5.

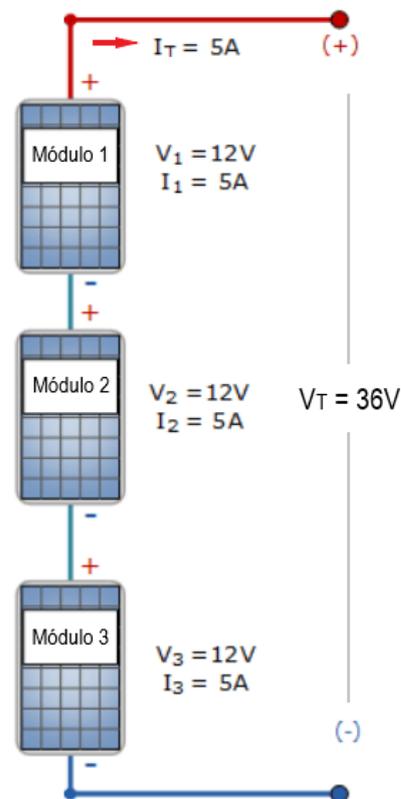
Em série: Nessa ligação o sistema fotovoltaico tem por tensão de saída a soma das tensões de cada módulo, enquanto a corrente mantém-se constante, o terminal negativo de um módulo liga-se ao positivo de outro módulo, formando-se então a ligação em série, como consta na Figura 6.

Figura 5 – Ligação em paralelo.



Fonte: Adaptado de (TUTORIALS, 2020).

Figura 6 – Ligação em série.



Fonte: Adaptado de (TUTORIALS, 2020).

2.2 Tipos de Módulos Fotovoltaicos

As tecnologias dos módulos são caracterizadas pela utilização de diferentes semicondutores nas células, caracterizando-as em três gerações.

2.2.1 Primeira Geração

Os módulos desta geração apresentam uma vida útil de aproximadamente 25 anos, devido à degradação de potência. É esperada uma perda anual de potência de 0,5%; desse modo, por volta de 25 anos, o módulo estará operando com cerca de 80% da potência nominal (PINHO; GALDINO, 2014).

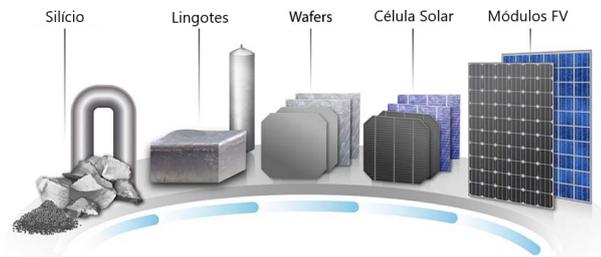
Como visto na explicação do funcionamento da célula solar, para formar a junção pn, adiciona-se em um lado da estrutura do silício, um elemento doador de elétrons como o fósforo, arsênio ou antimônio, formando a camada tipo n da célula. No outro lado, para

formar a camada tipo p, se introduz um elemento dopante tipo p, como boro, gálio, alumínio ou índio. Apesar do alto custo, são as células mais utilizadas no mundo por conta de sua alta eficiência e durabilidade. As células fotovoltaicas de primeira geração são fabricadas a partir de *wafers* do semicondutor silício, podendo ser monocristalino ou policristalino.

A partir do aquecimento do quartzo (SiO_2) e da remoção do oxigênio, obtém-se o silício líquido, que é então solidificado, originando o silício metalúrgico (MG-Si), com pureza de aproximadamente 98%. Esse processo consome muita energia, cerca de 10-12MWh para a produção de uma tonelada de MG-Si. O MG-Si passa por processos de purificação, sendo transformado em silício grau semicondutor, a partir do qual se obtém o polissilício, utilizado na fabricação dos lingotes (SATPATHY; PAMURU, 2021a)(SATPATHY; PAMURU, 2021b).

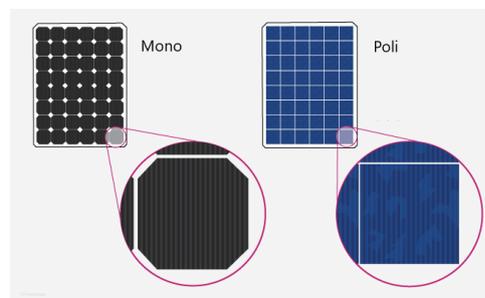
Os lingotes do silício altamente puro são cortado em discos, e passarão por um processo de lapidação, resultando então nos finíssimos filmes chamados de *wafers*, o processo está exemplificado na Figura 7. A Figura 8 mostra a diferença aparente das células monocristalinas e policristalinas em seus respectivos módulos.

Figura 7 – Processo de produção.



Fonte: Adaptado de (NREL, 2021).

Figura 8 – Célula Monocristalina e Policristalina.

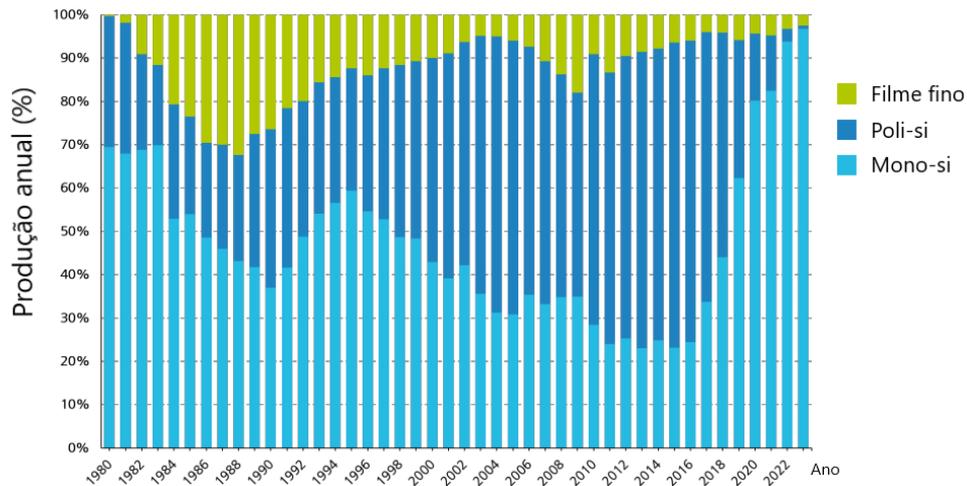


Fonte: Adaptado de (SOLAR, 2021).

A quantidade de materiais utilizados nas células vem diminuindo com o tempo, por conta do aumento da eficiência e a utilização de *wafers* mais finos. Isso implica diretamente

na diminuição dos preços; em 2023, cerca de 97% da produção mundial de módulos, foi de células de c-Si, com grande dominância da célula de Silício Monocristalino (m-Si), enquanto a de Silício Policristalino (p-Si) entra em declínio, como mostra a Figura 9. A Figura 10 mostra como a diminuição da espessura do *wafer* impactou na utilização do polissilício na fabricação das células, justificando a queda dos preços (PHILIPPS; WARMUTH, 2024).

Figura 9 – Produção anual dos módulos de primeira e segunda geração.



Fonte: Adaptado de (PHILIPPS; WARMUTH, 2024).

Figura 10 – Espessura e queda do consumo de polissilício.



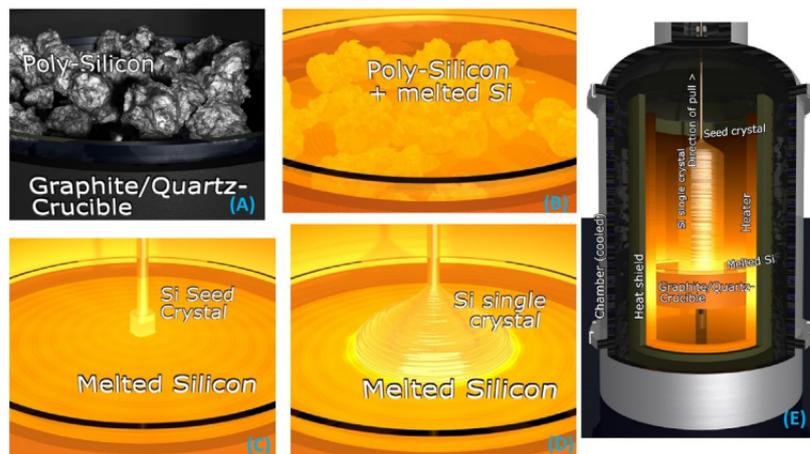
Fonte: Adaptado de (PHILIPPS; WARMUTH, 2024).

2.2.1.1 Célula de Silício Monocristalino (m-Si)

A eficiência dessa célula pode chegar a 26,1% (NREL, 2025). Por conta do elevado grau de pureza dos *wafers* de silício, as células monocristalinas apresentam uma alta performance, sendo uma das mais eficientes do mercado, entretanto a tecnologia usada para alcançar a extrema pureza a torna a mais cara.

A fabricação do lingote, em geral, se dá pelo método Czochralski. Após derreter o polisilício no crisol, mergulha-se um cristal de semente de silício na fusão do líquido. A semente vai ser puxada, com rotação, ao mesmo tempo que ocorre o processo de crescimento do cristal monocristalino, formando o lingote, como consta na Figura 11. Esse processo, traz uma pureza maior ao lingote, com segregação de impurezas (SATPATHY; PAMURU, 2021b).

Figura 11 – Produção do lingote de m-si.



(A) Polissilício no crisol de quartzo. (B) Polissilício e silício derretido. (C) Adição da semente de cristal no silício derretido. (D) Crescimento do silício monocristalino. (E) Estrutura da câmara utilizada para o método Czochralski.

Fonte: Adaptado de (SATPATHY; PAMURU, 2021b).

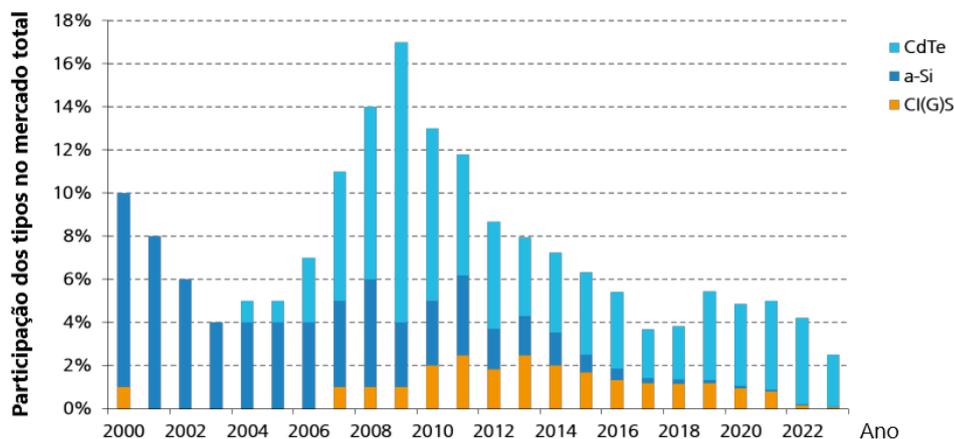
2.2.1.2 Célula de Silício Policristalino (p-Si)

O processo de fabricação do lingote é mais simples que o do m-Si, a tecnologia de fabricação não é tão complexa. A eficiência dessa célula pode chegar a 24,4% (NREL, 2025). O lingote é obtido ao derreter o polissilício em um crisol, num formato quadrado, e após o seu resfriamento, os cristais sólidos crescem (SATPATHY; PAMURU, 2021b). Posteriormente, o lingote é então fatiado para a fabricação dos *wafers* de p-Si.

2.2.2 Segunda Geração

Essa geração caracteriza as células de filme fino, recebem esse nome por serem extremamente finas chegando a uma espessura de $1\mu\text{m}$. Ao contrário das células de c-Si que possuem uma espessura de $350\mu\text{m}$, as células dessa geração podem ser utilizadas em superfícies flexíveis ou firmes. Se dividem em células de a-Si, CdTe e CIGS, cujos módulos têm um tempo de vida entre 10 e 20 anos (VICKERMAN, 2025). Apresentam um menor custo por não necessitar da tecnologia envolvida no aumento de pureza dos elementos, como o c-Si, e também por utilizar menos materiais. Apesar do baixo custo, apresentam uma eficiência menor e sua representatividade no mercado é baixa (PINHO; GALDINO, 2014). Em 2023 a participação no mercado global, desse tipo de célula, foi cerca de 2,5% (PHILIPPS; WARMUTH, 2024). A Figura 12 apresenta a evolução da participação dos principais tipos de filme fino no mercado global ao longo dos anos.

Figura 12 – Participação de mercado dos filmes finos no mercado total.



Fonte: Adaptado de (PHILIPPS; WARMUTH, 2024).

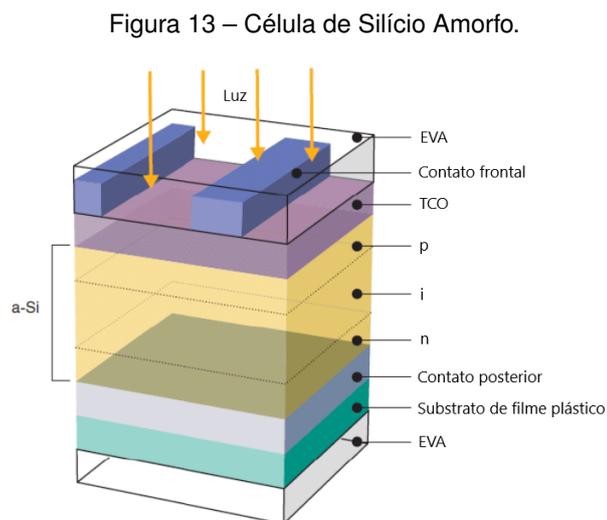
Nessa célula são introduzidas novas camadas, uma delas é composta por Óxido Condutor Transparente (TCO), que tem a finalidade de permitir a passagem de luz, atuando como um revestimento antirreflexo, além disso, ele atua como um eletrodo, conduzindo a eletricidade (CHAVAN et al., 2023). O TCO pode ser feito de diferentes materiais, atualmente os mais utilizados nas células de filme fino são o Óxido de Zinco dopado com Alumínio (ZnO:Al), Óxido de Índio e Estanho (ITO) e o Óxido de Estanho dopado com Flúor (FTO) (CHAVAN et al., 2023). A outra camada presente nessa célula é o substrato, pode ser constituído de plástico ou vidro, e tem a função de dar suporte estrutural às camadas semicondutoras da junção. Como o substrato é o responsável pela sustentação da célula, a

estrutura do módulo de filme fino, em geral, não apresenta a moldura de alumínio, presente no módulo de c-Si.

2.2.2.1 Célula de Silício Amorfo (a-Si)

A eficiência dessa célula é aproximadamente 14% e apresenta um tempo de vida de cerca de 15 anos (NREL, 2025) (PASTUSZAK; WEGIEREK, 2022). Ao contrário do c-Si, esse silício não possui um arranjo definido de átomos, por isso apresenta defeitos que podem interferir em suas características de semicondutor. Ademais, esse arranjo desordenado permite a criação das camadas finas de silício. Na prática, as células de a-Si comumente são passivadas com o hidrogênio para aumentar a eficiência e diminuir os defeitos (BADRAN; LAZAROV, 2025).

Essa célula é uma tripla junção PIN constituída de três camadas semicondutoras, cuja representação consta na Figura 13. O processo de dopagem desse silício é semelhante ao que ocorre na célula de silício cristalino, entretanto haverá uma terceira camada de silício não dopado entre as camadas tipo p e tipo n, chamada de camada intrínseca (tipo I), ela serve para captar os elétrons que estão passando da camada n para p. Além disso, a camada do TCO é feito de dióxido de estanho (SnO_2) e o substrato de vidro (PINHO; GALDINO, 2014).



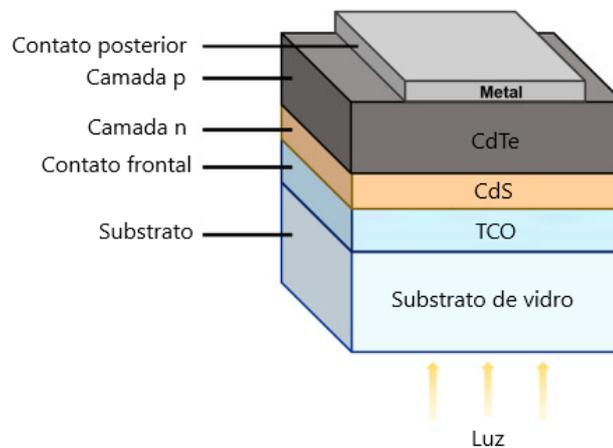
Fonte: Adaptado de (FRAAS, 2014).

2.2.2.2 Célula de Telureto de Cádmio (CdTe)

Essa célula pode chegar a uma eficiência de 23,08% e um tempo de vida de 20 anos (NREL, 2025)(PASTUSZAK; WEGIEREK, 2022). É constituída de uma junção com dois semicondutores diferentes, a região N é formada pelo Sulfeto de Cádmio (CdS) e a P pelo CdTe. O esquema dessa célula consta na Figura 14. Apesar do baixo custo, esta célula não é amplamente utilizada por conta da toxicidade do elemento cádmio e pela relativa escassez do telúrio, que é um subproduto do cobre.

A camada do substrato nessa célula é diferente, a configuração mais fabricada é o superstrato, em que o substrato fica na parte superior da célula. O vidro é a melhor opção para o substrato, visto que é necessário que seja transparente e que suporte altas temperaturas. Em geral, o vidro é revestido com um revestimento antirreflexo para melhor eficiência da célula. O TCO mais utilizado é geralmente o FTO, enquanto que o contato posterior é feito com cobre ou outros materiais como o Telureto de Zinco (ZnTe), Telureto de Antimônio sobre Molibdênio (Sb_2Te_3/Mo), entre outros (RAHMAN, 2022).

Figura 14 – Célula de CdTe.



Fonte: Adaptado de (RAHMAN, 2022).

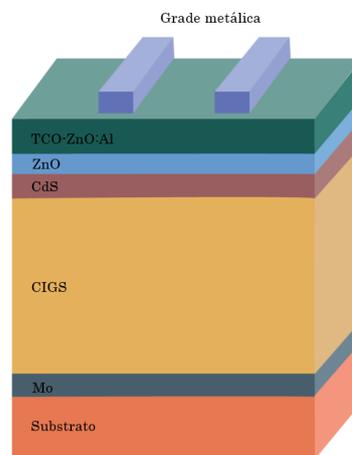
2.2.2.3 Célula de Seleneto de Cobre Índio Gálio (CIGS)

Apresenta maior custo de produção que as outras células de filme fino, por conta de sua maior complexidade e utilização de elementos escassos (BADRAN; LAZAROV, 2025). Contudo, possui um tempo de vida de cerca de 12 anos (PASTUSZAK; WEGIEREK, 2022). Além disso, é a célula de filme fino que apresenta maior eficiência, chegando a 23,6%

(NREL, 2025).

A Figura 15 apresenta o esquema dessa célula. O substrato pode ser feito de plástico, vidro ou aço inoxidável, enquanto que o contato posterior é constituído de Molibdênio (Mo). A camada tipo P é constituída de CIGS, enquanto que existem duas camadas tipo N nessa célula, a camada de Óxido de Zinco (ZnO), e a camada de transição que, em geral, é constituída por CdS, mas pode ser substituído por sulfeto de zinco (ZnS), seleneto de zinco (ZnSe) ou outros materiais. A camada de TCO é constituída de ZnO:Al ou ITO. Sobre o TCO está a grade metálica, feita de prata (Ag) ou alumínio/níquel (Al/Ni), responsável por coletar a corrente (TEKNETZI; HOLGERSSON; EBIN, 2023).

Figura 15 – Célula de CIGS.



Fonte: Adaptado de (KAHANA, 2024).

2.2.3 Terceira Geração

As células que se encaixam nessa geração, em sua maior parte, ainda estão em processo de pesquisa e desenvolvimento, assim como os seus respectivos processos de reciclagem. A estrutura dessas células podem apresentar variações, por conta de testes que estão sendo realizados atualmente, onde se avaliam novos materiais para aprimorar a eficiência.

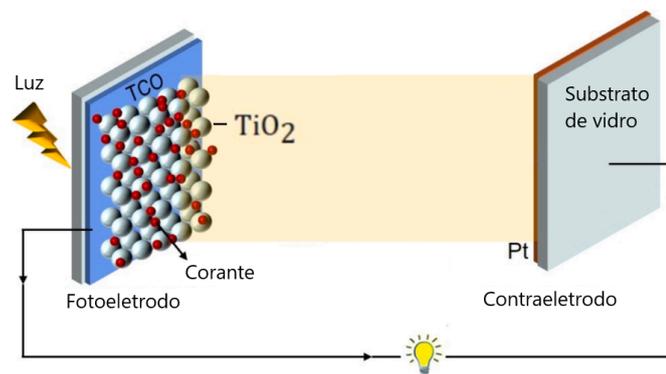
Nessa seção são tratadas apenas as células sensibilizadas por corantes (*Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC)), as Células Solares Orgânicas (OSC) e a PSC. Devido à composição dessas células, os módulos fotovoltaicos apresentam uma vida útil reduzida, de poucos meses (TRIVEDI; MESHRAM; GUPTA, 2023). Isso pode gerar bastante resíduo fotovoltaico, em um curto espaço de tempo, reforçando a grande necessidade da reciclagem, além do

aprimoramento dessa tecnologia.

2.2.3.1 Célula sensibilizada por corante (DSSC)

Com processo de fabricação simples e de custo baixo, essa célula difere das outras constituídas pela junção PN. Apresenta em sua estrutura dois substratos de vidro revestidos por camadas de TCO, comumente feito de FTO ou ITO. Sobre uma das camadas de TCO, há uma camada de nanocristais do semicondutor Dióxido de Titânio (TiO_2) sensibilizada por corantes, funcionando como fotoeletrodo. Sobre a outra camada de TCO, encontra-se o contraeletrodo, em geral composto por platina, que atua como catalisador. O esquema das camadas dessa célula consta na Figura 16 (LIN et al., 2025).

Figura 16 – Estrutura da DSSC.

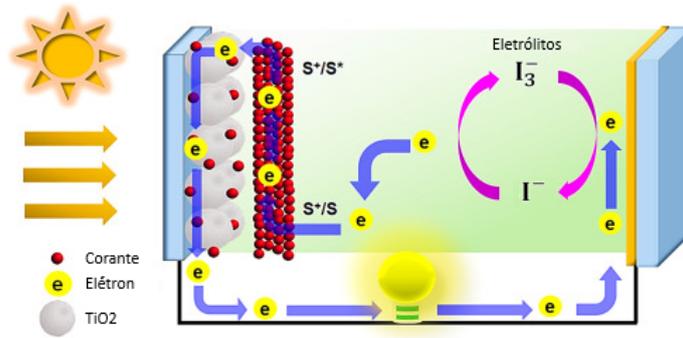


Fonte: Adaptado de (LIN et al., 2025).

Após a incidência da luz excitar o corante, esse é oxidado, liberando elétrons que são transferidos para a camada do TiO_2 . Pode ocorrer um processo de recombinação, não desejada e semelhante à junção PN visto nas células anteriores, na qual os elétrons do semicondutor TiO_2 preenchem os buracos no corante oxidado, comprometendo a vida útil da célula. Os elétrons injetados no semicondutor se difundem pela camada até chegarem no TCO, saindo então pelo circuito externo. Após passarem pela carga, os elétrons chegam ao contraeletrodo, onde ocorre a reação de redução pelo eletrólito. Composto pelo par iodeto/triodeto (I^-/I_3^-), o eletrólito tem a função de fornecer elétrons ao corante, regenerando-o. Enquanto o iodeto fornece elétrons ao corante, o triiodeto, formado após o iodeto ceder elétrons, recebe os elétrons vindos do contraeletrodo. Esse processo acontece várias vezes por segundo, formando a corrente contínua a partir da luz solar. O esquema do funcionamento da célula consta na Figura 17. Dependendo do corante utilizado,

podendo ser orgânico ou inorgânico, a eficiência dessa célula pode variar. De acordo com pesquisas, se forem usados corantes feitos com complexos de rutênio a eficiência pode chegar a mais de 11% (LIN et al., 2025) (BASHIR et al., 2022).

Figura 17 – Funcionamento da DSSC.



Fonte: Adaptado de (BASHIR et al., 2022).

2.2.3.2 Célula solar orgânica (OSC)

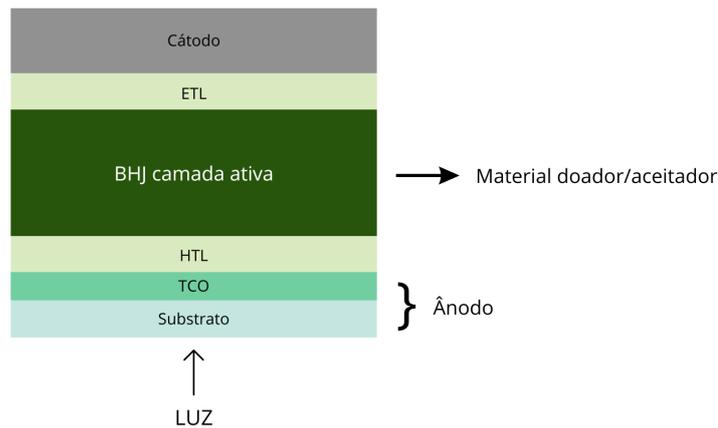
Apresentam baixo custo de produção, são compostas por materiais orgânicos, como polímeros e outros materiais a base de Carbono. Funciona a partir da passagem de elétrons da junção doadora para absorvedora (NGAGOUM NDALLOKA et al., 2024). Com o tempo, a eficiência dessa célula diminui devido à degradação causada pelo contato do oxigênio e água nas camadas, sendo esse o principal desafio a ser melhorado na sua produção (HERMENAU et al., 2011).

Existem alguns tipos de OSC, as monocamadas, bicamadas, a heterojunção em massa, do inglês (*Bulk Heterojunction* (BHJ)), entre outras. As células de BHJ atingem a maior eficiência dentre as OSC, chegando a 20%, e é nela que esse trabalho se concentra (MAJHI et al., 2025).

A estrutura da célula de BHJ, representada na Figura 18, consiste em um cátodo e um ânodo, e entre eles, uma camada ativa composta por materiais doadores e aceitadores de elétrons. Entre a camada ativa e os eletrodos, estão a camada de transporte de elétrons, do inglês *Electron Transport Layer* (ETL), e a camada de transporte de buracos, do inglês *Hole Transport Layer* (HTL). A camada ETL é comumente constituída por ZnO ou PFN-Br, enquanto a HTL é por PEDOT:PSS. O material doador é constituído por materiais poliméricos como o P3HT, PBDB-T, entre outros. Já o material aceitador é, atualmente, constituído

por moléculas pequenas como Y6, ITIC, entre outros. O TCO utilizado geralmente é o ITO, funcionando como ânodo, enquanto que o cátodo pode ser um metal como alumínio ou cálcio. O substrato pode ser de metal, como o aço, de vidro, ou de polímeros, como o Politereftalato de etileno (PET) (BENDENIA et al., 2021)(MAJHI et al., 2025) (SUN et al., 2024).

Figura 18 – Estrutura da célula BHJ.



Fonte: Próprio autor.

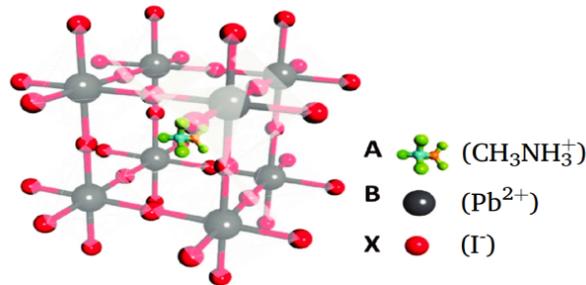
Após a incidência da luz, a camada ativa absorve a energia dos fótons. Os materiais doadores e aceitadores, presentes na camada, fazem a separação do par elétron-buraco. O elétron vai em direção ao cátodo, conduzido pela ETL, saindo pelo circuito externo, enquanto que o buraco vai em direção ao ânodo, conduzido pela HTL, gerando assim a corrente contínua. A célula de BHJ é a que apresenta melhor separação do par elétron-buraco, por isso tem maior transporte de cargas e uma eficiência maior (MAJHI et al., 2025).

2.2.3.3 Célula solar de Perovskita (PSC)

São constituídas por materiais que possuem a estrutura semelhante ao mineral perovskita, com a forma ABX_3 , onde X é um ânion haleto de iodo (I^-), bromo (Br^-) ou cloro (Cl^-). O B é um cátion de chumbo (Pb^{2+}), germânio (Ge^{2+}) ou estanho (Sn^{2+}). Já o A é um cátion grande, de césio (Cs^+) ou metilamônio (Ma^+/CH_3NH_3) (CAO et al., 2025). A forma mais comum dessa célula é a perovskita de Haleto de Chumbo (Pb-H) ($CH_3NH_3PbX_3$), pois esses materiais apresentam bom tempo de vida, boa absorção de luz e por isso são muito eficientes na produção da eletricidade (SEYISI et al., 2025) (OH; BAE; HAN, 2025).

Além disso, apresentam uma alta eficiência, chegando a 26,95% (NREL, 2025). A Figura 19 mostra a estrutura cristalina de uma perovskita de iodeto de chumbo. No entanto, apesar da alta eficiência, existe uma grande preocupação com a utilização do chumbo, várias pesquisas estão sendo feitas para a produção de células com materiais menos tóxicos ao meio ambiente (SEYISI et al., 2025) (OH; BAE; HAN, 2025).

Figura 19 – Estrutura cristalina da PSC.



Fonte: Adaptado de (SEYISI et al., 2025).

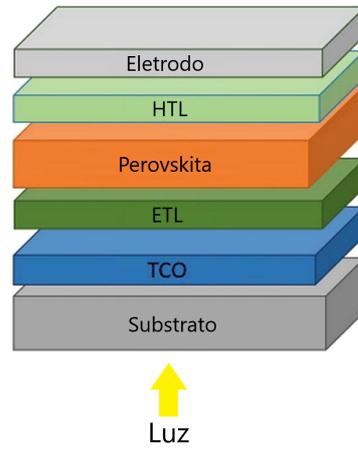
A estrutura dessa célula consta na Figura 20. O substrato de vidro é revestido com o TCO, que em geral é de FTO ou de ITO e representa o cátodo da célula. Após o TCO se encontra a camada de transporte de elétrons ETL, ela pode ser composta por óxidos metálicos como ZnO , TiO_2 , CdS ou outros materiais (SEYISI et al., 2025).

Em seguida vem a camada absorvedora de perovskita. Após essa, se encontra a camada de transporte de buracos HTL, que é comumente constituída por Spiro-OMeTAD, tiocianato cuproso de cobre (CuSCN), óxido de níquel (NiO), iodeto de cobre (CuI) ou outros materiais (SEYISI et al., 2025).

Por fim, devido ao ouro ser um bom condutor de eletricidade e resistente à corrosão, o eletrodo metálico anódico geralmente é feito com ele. Contudo, o ouro pode ser substituído por cobre, prata ou alumínio, entretanto esses apresentam menor resistência à corrosão, apesar do baixo custo (SEYISI et al., 2025).

A luz excita a camada absorvedora de perovskita, causando sua oxidação, a liberação de elétrons e a formação de buracos. Os elétrons atravessam a camada ETL e o TCO, saindo pelo circuito externo em direção ao eletrodo. Enquanto isso, a camada HTL doa elétrons para a camada da perovskita, regenerando-a ao seu estado inicial. Ao mesmo tempo, os buracos, provenientes da excitação da perovskita, passam pela camada HTL chegando ao eletrodo, que está recebendo os elétrons vindos do TCO. Esse movimento dos elétrons origina a corrente contínua (SEYISI et al., 2025).

Figura 20 – Estrutura da célula de perovskita.



Fonte: Adaptado de (CHI; BANERJEE, 2023).

3 Reciclagem

A partir do conhecimento dos vários elementos utilizados na constituição do módulo fotovoltaico, torna-se evidente a necessidade da reciclagem e recuperação de seus materiais constituintes. Os resíduos podem ser gerados desde a fabricação dos módulos e suas características variam de acordo com o tipo de célula solar, influenciando diretamente os processos de reciclagem adotados.

O processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos pode gerar uma grande quantidade de resíduos, como células defeituosas, vidro, caixa de junção, fios de cobre e resíduos plásticos. Além disso, durante o transporte do módulo, podem ocorrer danos, como rachaduras, que resultarão em mais resíduos. Ao longo do tempo de uso, falhas em diodos, falhas elétricas, degradação por neve, chuva ou granizo, além de danos na caixa de junção, contribuirão para o aumento das perdas (NGAGOUM NDALLOKA et al., 2024).

Diante do cenário de grande descarte dos módulos fotovoltaicos, será necessário gerenciar corretamente os resíduos para reduzir os impactos e recuperar os metais preciosos. É possível utilizar os materiais recuperados em módulos novos, reduzindo significativamente a necessidade de materiais virgens, contribuindo de forma econômica e ambiental.

3.1 Módulos de Silício Cristalino

Como visto no esquema da célula solar, na seção 2.1.1, os contatos metálicos estão presentes nos dois lados do *wafer*. No contato frontal, utiliza-se a prata devido a sua resistência à corrosão e ótima condutividade. Essa camada é depositada sobre o semicondutor por um processo térmico que envolve uma pasta de solda contendo prata e, em certos casos, chumbo (PRADO, 2018). Já o contato posterior é geralmente composto de alumínio, podendo também conter prata. Para formar um módulo, a conexão dessas células é feita por fios de cobre estanhado, soldados sob os contatos metálicos.

De acordo com Preet e Smith (2024), a Tabela 1 apresenta a composição média de 1000 kg de módulos de c-Si usados. Materiais como o vidro e alumínio, conseguem ser reciclados com uma eficiência superior a 85%. Como constituem a maior parte do módulo, sua recuperação é de extrema importância para a viabilidade econômica do processo de reciclagem (PREET; SMITH, 2024).

Tabela 1 – Composição de Módulos de c-Si.

Componente	Massa (kg) em 1000 kg de módulos
Vidro	700,00
Moldura de liga de Alumínio	180,00
Células	36,50
Eletrodos de Alumínio	5,30
Eletrodos de Prata	0,53
Outros metais (Estanho, Chumbo, Gálio, Cádmiio)	0,53

Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

A etapa inicial da reciclagem é a desmontagem, que pode ser de forma manual ou mecânica, envolve a remoção dos fios, da caixa de junção e da moldura de alumínio. Para recuperar o alumínio é necessário passar por um tratamento mecânico e de pirólise (decompõe o material em altas temperaturas) (PREET; SMITH, 2024). Após a retirada desses constituintes do módulo fotovoltaico, restam as camadas posteriores como a do vidro, do EVA e da célula solar.

A partir do grau do material a ser reciclado, os tratamentos de reciclagem podem ser classificados como superior, médio e inferior. Os tratamentos médio e inferior incluem tratamentos mecânicos como martelamento, trituração e esmagamento. Já o tratamento superior tem o objetivo de recuperar os *wafers* de Silício, vidro, e metais valiosos como cobre, prata e alumínio. Esse tratamento possui duas etapas: a delaminação do módulo, que ocorre por meio de processos físicos, químicos e térmicos, e a recuperação dos metais e silício (PREET; SMITH, 2024).

O processo de reciclagem para os módulos de silício inicia-se com a separação da moldura de alumínio, utilizando um martelo, depois retira-se o *backsheet* por um processo mecânico, como utilizando um rolo de lâmina. A camada de EVA e vidro é retirada na forma de pequenos fragmentos, vai ser necessário triturar, com um triturador ou martelo, e rolar os pedaços para separar e recuperar o vidro do EVA (PREET; SMITH, 2024).

Por fim, os pedaços do EVA, silício e dos metais são enviados para um máquina de moagem onde serão esmagados até se tornarem pequenas partículas que, após esse processo, irão passar por um separador densimétrico resultando em uma fração rica de metais e outra rica em polímeros. Essas frações irão passar por processos químicos e térmicos que recuperarão os metais valiosos (PREET; SMITH, 2024). A Figura 21 mostra o

diagrama da reciclagem do módulo de silício.

Figura 21 – Diagrama do processo de reciclagem do módulo fotovoltaico.

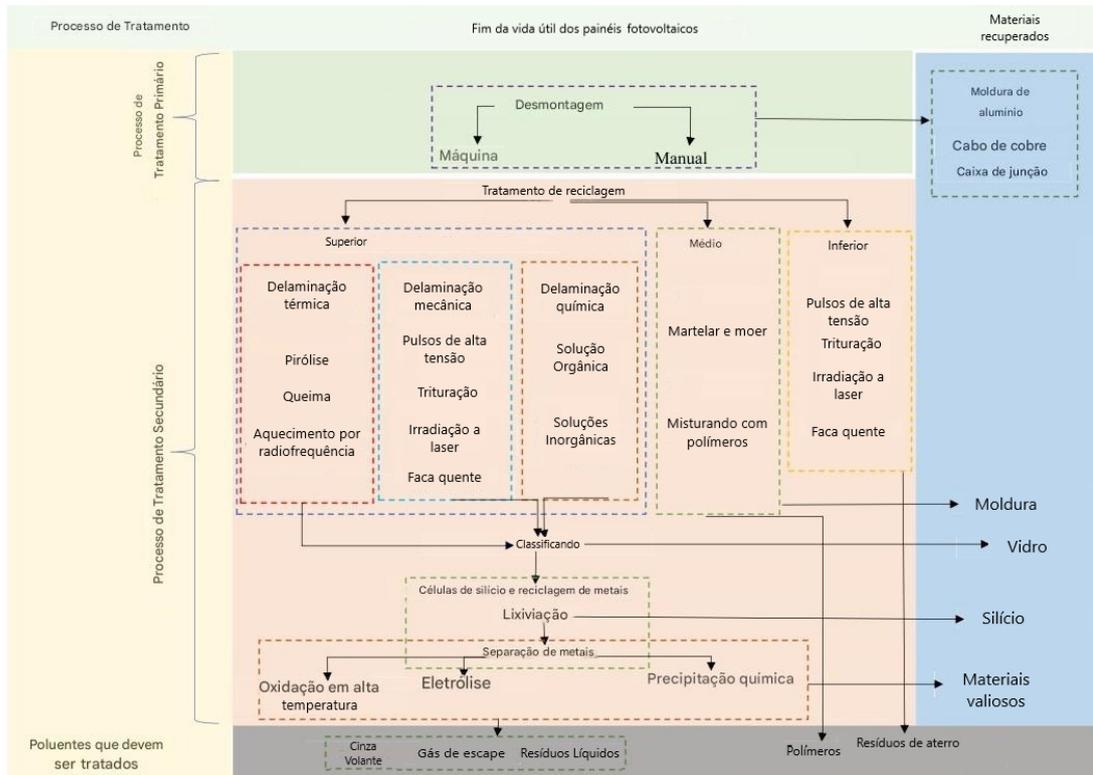


Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

3.1.1 Processos de tratamento

Diferentes autores testaram processos de tratamentos físicos, térmicos e químicos, e com isso é possível analisar qual método é mais viável a partir dos seus produtos recuperados. O processo físico envolve tratamentos mecânicos como pulsos de alta tensão, trituração, irradiação a laser, faca quente e moagem. O processo térmico envolve pirólise, queima e aquecimento por radiofrequência, enquanto o processo químico é baseado em soluções orgânicas e inorgânicas, variando o solvente. A Figura 22 mostra o esquema dos tratamentos, enquanto as Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os materiais recuperados nos métodos utilizados por autores como Latunussa et al., Shin et al., Azeumo et al., Yan et al., entre outros (PREET; SMITH, 2024).

Figura 22 – Esquema do processo de reciclagem.



Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

Tabela 2 – Tratamento Físico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.

Autor	Método utilizado	Produtos recuperados	Observações
Dias et al. (2018)	Moagem e separador eletrostático	Célula solar, Outros metais	Recuperação de vidro grau 100%, Recuperação de metais grau 70%.
Nevala et al. (2019)	Pulso de alta tensão	Prata, Estanho, Cobre, Silício e Alumínio	Recuperação de Cobre e Alumínio de grau 100%; Recuperação de Prata grau em torno de 90%.
Strachala et al. (2017)	Trituração usando triturador de corrente	Células solares trituradas e outros materiais	Recuperação de vidro grau 100%; Recuperação de metais grau 60%.
Li et al. (2022)	Irradiação a laser	Vidro e Célula solar	Remoção completa da camada de EVA; Redução de emissões de gases de efeito estufa; Nenhum efeito nos módulos.
Latunussa et al. (2016)	Faca quente	Vidro de grau 100%	Alta taxa de enriquecimento de metais; Mais econômico; Redução de emissões de gases de efeito estufa.

Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

Tabela 3 – Tratamento Térmico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.

Autor	Método utilizado	Produtos recuperados	Observações
Wang et al. (2012)	Queima	Wafers de Silício e Vidro	O módulo foi aquecido a 330 °C e 400 °C.
Shin et al. (2017)	Pirólise	Wafers de Silício	O módulo foi mantido no forno a 480 °C.
Strachala et al. (2017)	Pirólise	Wafers de Silício	Os wafers foram aquecidos no forno a 420 °C por 25 minutos.

Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

Tabela 4 – Tratamento Químico na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos.

Autor	Método utilizado	Produtos recuperados	Observações
Shin et al. (2017)	Solvente Orgânico	Eletrodos de alumínio e prata; Wafers de Silício	Célula solar com eficiência igual a célula nova.
Azeumo et al. (2019)	Solvente Orgânico	Wafers de Silício	Recuperou 95% da célula solar.
Yan et al. (2020)	Solvente Inorgânico, KOHetanol	Wafers de Silício	Recuperou 100% dos wafers; Baixas emissões ambientais; Alto consumo de energia.

Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

Observação: Solução de Hidróxido de Potássio em Etanol (KOHetanol).

Após recuperar os *wafers* de silício, os metais, o alumínio e o vidro, o silício é recuperado por meio da corrosão química, que remove os eletrodos de prata, as camadas antirreflexivas, a junção pn e revestimentos de alumínio presentes nos módulos. A recuperação do silício depende do grau de pureza. Quando a pureza é menor, ele é recuperado por um processo de corrosão mais simples, o pó de silício de baixa qualidade é utilizado na produção de materiais de ânodos para baterias de íons de lítio. Já os *wafers* de silício de alta pureza são recuperados por um processo de corrosão mais complexo (PREET; SMITH, 2024).

Para a recuperação do silício de baixo grau de pureza, o autor Eshraghi et al. (2020) eliminou impurezas como prata, chumbo e alumínio pelo processo de lixiviação do *wafers*, esse silício recuperado foi moído para a produção de ânodos para baterias de íons de lítio. Zhang et al. (2021) eliminou eletrodos de prata e alumínio do *wafers* por um processo de corrosão química, o silício micronizado vai ser convertido em silício poroso por um tratamento com sal fundido (PREET; SMITH, 2024).

O silício de alta pureza é recuperado por soluções de corrosão com Ácido Fluorídrico (HF) ou sem HF. A Tabela 5 apresenta os estudos abordados por alguns autores, mostrando os reagentes utilizados nas soluções, bem como o percentual de recuperação e o grau de pureza do silício. Os compostos químicos que podem fazer parte das soluções incluem: Ácido Nítrico (HNO_3), Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), Ácido Acético (CH_3COOH), Ácido Clorídrico (HCl), Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2), Hidróxido de Sódio ($NaOH$), Ácido Fosfórico (H_3PO_4).

A recuperação de metais valiosos como prata, cobre e alumínio pode ser feita de diferentes formas. Dias et al. (2016) extraiu 94% de prata pura, ao imergir o módulo fotovoltaico em uma solução de ácido nítrico e cloreto de sódio. Savvilotidou e Gidaracos (2020) avaliaram três métodos de extração da prata, sendo eles: a pirólise e separação gravimétrica, a pirólise e moagem mecânica, e a pirólise e tratamento químico, por fim notou-se que

Tabela 5 – Recuperação do Silício.

Autor	Método utilizado	Silício recuperado (%)	Observações
Kang et al. (2012)	Imersão em solução de HF, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , CH ₃ COOH e H ₂ O por 20 min.	86	Grau de pureza do silício: 99.99.
Wang et al. (2012)	HCl/H ₂ O ₂ /H ₂ O para remover alumínio, HF (5%) para remover camada antirreflexiva e prata, NaOH (25%) para remover junção PN.	62	Grande perda de silício durante o processo de corrosão com o NaOH.
Jung et al. (2016)	HNO ₃ , H ₃ PO ₄ e KOH para remover eletrodos de alumínio e prata, camada antirreflexiva e junção PN	80	Não especificado o grau de pureza do silício; Perda parcial do silício durante o processo de corrosão.
Punathil et al. (2021)	Imersão em NaOH/HNO ₃ /H ₃ PO ₄	99.9	A solução de NaOH é mais econômica que a de KOH.

Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

o método da pirólise e separação gravimétrica foram o melhores, recuperando cerca de 91,42% e 94,25% de prata dos módulos. Chung et al. (2021) usou uma solução de iodo e iodeto de potássio num processo de lixiviação que recuperou 95% da prata em 5 minutos. Modrzynski et al. (2021) recuperou 88% de prata pura e 99% de cobre puro através de um processo de lixiviação eletroquímica, utilizando diamante dopado com boro como eletrodo e ácido sulfúrico como oxidante (PREET; SMITH, 2024).

Ngagoum Ndalloka et al. (2024) apresentam um processo de reciclagem que utiliza etapas mecânicas, sem a utilização de produtos químicos para a recuperação de metais, tornando o processo ambientalmente mais favorável. Após a separação da moldura, caixa de junção e cabos, o restante do módulo passa por uma etapa de trituração. Esse material triturado contém polímeros, metais e vidro, a separação do polímeros dos metais e vidros ocorre por meio de um processo que utiliza energia proveniente de ar comprimido. A porção contendo metais e vidro é vendida para centros de reciclagem propícios. A remoção da célula solar e dos interconectores se dá por separação ótica, esses, junto ao polímero separado, são incinerados ou enviados para usinas que utilizam resíduos na produção de energia. Os materiais recuperados desse processo, por não passarem por etapas químicas, não atingem o mesmo nível de pureza nem a mesma taxa de recuperação observada em processos que utilizam produtos químicos, entretanto destaca-se a alta recuperação de alumínio, cobre e vidro, com rendimentos superiores a 85% em peso (NGAGOUM NDALLOKA et al., 2024).

O processo utilizado para a análise do aspecto econômico da reciclagem inicia-se com a desmontagem dos módulos, retirada a moldura, separação desses e dos cabos e caixa de junção das camadas das células, vidro e EVA. Coleta-se então a estrutura de alumínio, os cabos e materiais plásticos são tratados em outra locação. Para a recuperação do vidro e sua separação do EVA, primeiramente os módulos são aquecidos por um sistema

de infravermelho e para o desprendimento mecânico utiliza-se o método da faca de alta frequência (LATUNUSSA et al., 2016).

Posteriormente, o vidro recuperado passa por um peneiramento, onde se separa os pedaços de vidro com impurezas, que serão descartados, e o vidro limpo vai ser refinado. A camada restante é então reduzida por um processo de corte e em seguida será incinerada, as cinzas resultantes são formadas pelos metais e cinzas volantes, que vão para um aterro apropriado para resíduos perigosos (LATUNUSSA et al., 2016).

As cinzas contendo metais são tratadas; através da peneiração separa-se o alumínio do restante, que é transferido para uma etapa de lixiviação ácida. Nessa etapa, utiliza-se HNO_3 para dissolver os metais, formando vários óxidos metálicos numa mistura contendo resíduos metálicos de silício. Essa mistura, passa por um processo de filtração a vácuo, onde recupera-se o silício, o esperado é que a lixiviação proporcione uma recuperação de 95% do silício em grau metalúrgico (MG-Si) (LATUNUSSA et al., 2016).

O restante do silício e dos metais são recuperados por eletrólise (separa-se os metais através da inserção de corrente), dessa maneira recupera-se prata e cobre com eficiência de 95%. Já os resíduos restantes na solução ácida são neutralizados com a adição de hidróxido de cálcio, e em seguida são filtrados por um filtro-prensa que separa a parte líquida de uma lama contendo os metais não recuperados. Esses resíduos são considerados perigosos e são descartados em aterros sanitários próprios. Foi estimado que a reciclagem de 1m² de módulos fotovoltaicos, gerou 0,7kg de lodo o que caracteriza 90% do custo de aterro, além disso foi estimado que para 1000kg de módulos reciclados gerará aproximadamente 375kg de resíduos (LATUNUSSA et al., 2016).

3.1.2 Aspecto econômico

A partir do método de reciclagem modelado por Latunussa et al. (2016), foi realizado um estudo no ponto de vista econômico. O custo total da reciclagem dos módulos se caracteriza pela soma do custo privado e custo externo, em seguida subtrai-se o valor da receita da reciclagem e avalia-se o lucro ou prejuízo do processo (PREET; SMITH, 2024).

O custo privado inclui os custos de investimento, do processo e do transporte. Os responsáveis pela reciclagem precisam arcar com custos de investimentos em equipamentos, materiais e eletricidade; alguns materiais que são utilizados durante o processo incluem diesel, ácido nítrico e água. Além disso, o custo de investimento inclui os custos de mão

de obra e coleta dos módulos fotovoltaicos (PREET; SMITH, 2024).

Os recicladores pagam pelo transporte dos módulos descartados até chegar à usina de reciclagem e pelo transporte de resíduos não perigosos, como vidro contaminado, lodo, cinzas volantes e resíduos líquidos, que serão descartados na terra. O custo de descarte desses resíduos inclui o manuseio devido deles (PREET; SMITH, 2024).

O custo externo se caracteriza pelo custo ambiental, e esse se dá pelos danos que o processo de reciclagem causa ao meio ambiente, como a liberação de poluentes, durante o processo e pelos veículos que transportam os módulos, os danos também incluem a incineração durante a etapa de aterro (PREET; SMITH, 2024).

Na reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino, o custo privado é de \$6,72/m², o custo externo é de \$5,71/m², resultando em um custo total de reciclagem de \$12,43/m². Os metais valiosos recuperados geram uma receita de \$13,62/m², sendo esse o benefício, resultando então em um lucro líquido de \$1,19/m². A distribuição da receita dos materiais recuperados é a seguinte: 46% alumínio, 25% prata, 15% vidro, 11% silício, 3% cobre. Além disso, foi estimado que o aumento da recuperação da prata em 25% elevaria a receita dos metais valiosos para o \$16,22/m² (PREET; SMITH, 2024).

3.1.3 Aspecto ambiental

A partir do estudo de Yuan e Xu (2024), nesta seção é analisado o impacto ambiental do processo de reciclagem, baseado em algumas etapas que são divididas em seis casos, conforme apresentado na Tabela 6. Todos os casos incluem inicialmente as etapas de transporte e desmontagem, antecedentes aos processos de tratamento. Em seguida, é realizada a etapa de lixiviação ácida. Após a extração de metais, o silício e vidro passam por uma etapa de reprocessamento industrial (YUAN; XU, 2024).

Tabela 6 – Casos para análise da reciclagem.

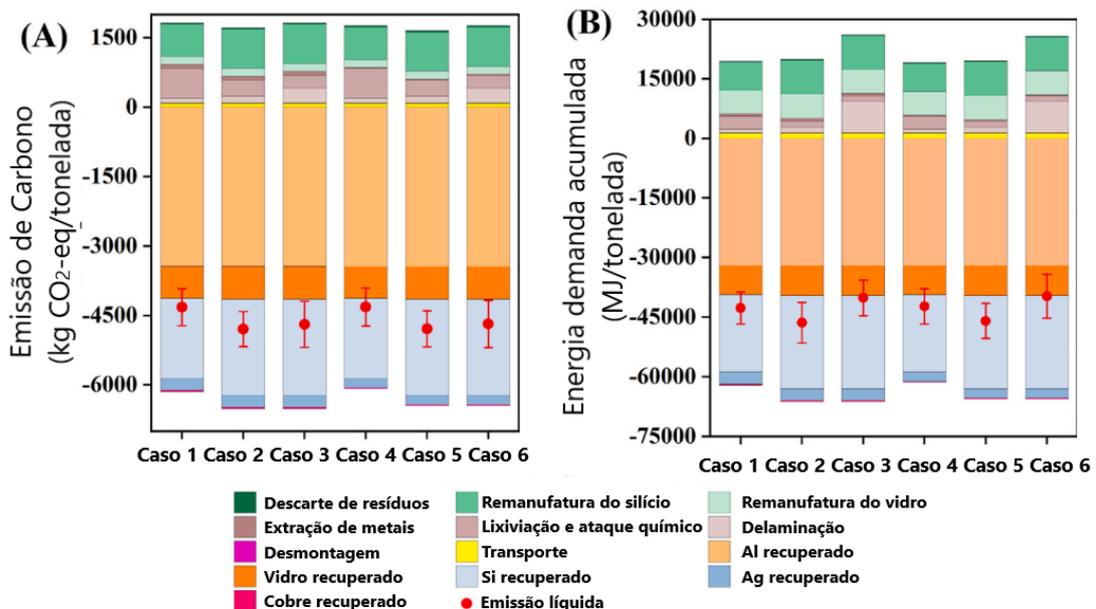
Etapa	Processo	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Delaminação	Tratamento Mecânico	x			x		
	Tratamento Térmico		x			x	
	Tratamento Químico			x			x
Extração de metais	Eletrólise	x	x	x			
	Precipitação				x	x	x

Fonte: Adaptado de (YUAN; XU, 2024).

Para as diferentes etapas dos casos, a Figura 23 apresenta as emissões de carbono e demanda cumulativa de energia utilizada no processo de reciclagem. Os valores negativos representam as emissões evitadas, considerando que os materiais recuperados seriam utilizados na produção de novos módulos, com mesma eficiência que os produzidos por materiais virgens. Já os valores positivos representam as emissões geradas no processo de reciclagem. Observa-se que o silício, que passará novamente pelo processo de fabricação (*silicon remanufacture*), é o principal responsável tanto pela emissões de carbono quanto pelo alto consumo da energia. Em segundo e terceiro lugar, estão as etapas de lixiviação e a delaminação, respectivamente (YUAN; XU, 2024).

Como o alumínio constitui maior parte do módulo e é recuperado quase totalmente no processo de reciclagem, ele representa a maior contribuição em termos de emissão evitada e energia economizada. Em seguida, destaca-se o silício recuperado, que, apesar da necessidade da refabricação, sua recuperação é mais benéfica do que produzir um módulo com materiais virgens. Como consta na Figura 23, para os diferentes casos, os valores de emissão evitados por tonelada de módulos, variam entre 4317 a 4796 kg CO₂-eq, enquanto a energia economizada fica entre 39790 a 46400 MJ (YUAN; XU, 2024).

Figura 23 – Emissões e energia cumulativa.



(A) Emissões de carbono. (B) Energia acumulada.

Fonte: Adaptado de (YUAN; XU, 2024).

3.2 Módulos de Silício Amorfo

Na literatura, a maioria dos trabalhos retrata de maneira geral a reciclagem dos módulos de filme fino, focando mais nos módulos de CIGS e CdTe, enquanto que a reciclagem do módulo de a-Si é feita de maneira superficial. A falta de muitos estudos sobre a reciclagem desse módulo e até de empresas que reciclem, se dá pela baixa eficiência do módulo e também pelo fato de que a reciclagem provavelmente não geraria uma alta receita, já que não tem recuperação de metais preciosos nem dos *wafers* de silício, que representam a maior parte da receita e do lucro na reciclagem dos módulos.

Apesar da escassez de estudos, alguns trabalhos realizaram testes de reciclagem com esse módulo. De acordo com Granata et al. (2014), o processo inicia desmontando os painéis manualmente para separar os módulos dos outros componentes; os testes são feitos utilizando 2kg de módulos.

O primeiro teste inicia o processo de reciclagem com a trituração, feita por um triturador giratório de duas lâminas, que resulta em pedaços pequenos, nessa etapa recupera-se uma fração contendo alumínio e outros metais. O alumínio pode ser recuperado, entretanto os outros metais terão que passar por tratamentos hidro/pirometalúrgicos para uma possível recuperação. Os pedaços provenientes da trituração passam por um tratamento térmico que decompõe o EVA, assim vai ser possível recuperar o vidro. Aproximadamente 70% da massa inicial da amostra vai ser recuperado como vidro em partículas de 1 a 5mm. Após serem feitas análises, verificou-se que, em partículas de vidro menores que 1mm, encontrava-se, silício e outros óxidos, como o de zinco e o de titânio, mostrando que o vidro não era limpo o suficiente para ser diretamente reutilizado (GRANATA et al., 2014).

O outro teste realizado inicia o processo com a trituração, através de um triturador giratório de duas lâminas. Em seguida, a trituração é feita utilizando martelos, que resultam em partículas ainda menores, permitindo a separação do vidro do EVA. A maior parte do vidro foi recuperada, em partículas de 0.08 a 1mm, sendo totalmente amorfa, ou seja, pode ser diretamente reciclada. Já o vidro, em partículas menores que 0.08mm, continha metais como ferro, zinco e estanho, o que inviabiliza sua recuperação direta (GRANATA et al., 2014).

O segundo teste, que utiliza a trituração com martelos, é mais viável, pois a maior parte do vidro recuperado já está propício à reciclagem. No entanto, em ambos os testes uma parte do material continua contaminada com metais, exigindo etapas adicionais de tratamento. Se essas etapas fossem realizadas no processo de reciclagem, os metais re-

cuperados seriam de baixo valor econômico, o que tornaria o processo pouco vantajoso. Logo a reciclagem para esse módulo se torna pouco atrativa e pouco aplicada.

3.3 Módulos de CdTe

Atualmente, a reciclagem desse módulo não é amplamente explorada, de forma que possuem poucos estudos sobre os custos e viabilidade econômica desse processo. A First solar, além de ser uma das maiores fabricantes de módulos solares de CdTe, é a única empresa que realiza, em grande escala, a reciclagem desse tipo dessa tecnologia. Portanto, o processo de reciclagem tratado neste tópico, será o adotado por essa empresa.

O processo inicia triturando o módulo em um triturador, resultando em pequenas frações do tamanho original, em seguida essas frações irão ser mais uma vez reduzidas ao passarem por um moinho de martelos. Essas etapas de trituração geram poeira, que são coletadas por dutos e enviadas para apropriados coletores de poeira. As partículas trituradas são compostas por vidro, em sua maioria, por materiais de encapsulamento e pelos elementos semicondutores. Após a trituração, as partículas serão submetidas a uma etapa de lixiviação, utilizando H_2SO_4 e H_2O_2 . Os materiais semicondutores dissolvem-se na fase líquida, enquanto que os outros materiais permanecem na fase sólida, de modo que são removidos da solução e prosseguem para a etapa de separação (CRSES, 2015).

Na etapa seguinte, os materiais do encapsulante são removidos do vidro, em um banho de separação com densidade específica, e os pedaços de vidro são enxaguados e coletados. Na solução lixiviada contendo metais, a partir do controle do pH utilizando $NaOH$, o cádmio e telúrio vão ser precipitados e passarão por uma etapa de filtração e lavagem. Após essa etapa, vai ser produzido um “bolo” de material semicondutor não refinado, que será enviado a empresas de refino, e essas produzirão CdTe em grau semicondutor para ser utilizados em novos módulos. Mais de 90% do material semicondutor e do vidro são reciclados no processo. Uma pequena fração de vidro residual e o EVA não são recuperados, de modo que são tratados e descartados em locais apropriados, como aterros sanitários (CRSES, 2015).

3.3.1 Aspecto econômico e ambiental

Nesse tópico é feita uma estimativa do custo e receita da reciclagem, visto que não se encontra na literatura. O módulo de CdTe utilizado como base, é o da First Solar, que apresenta uma área de 2,8m², peso entre 38,4-39,7kg, uma potência de 525W e eficiência de 18,8% (SOLAR, 2024). A estimativa é baseada na literatura disponível e no que foi apresentado nos processos de reciclagem de outras células, como a de CIGS e c-Si.

Sinha, Cossette e Menard (2012) divulgaram o inventário do ciclo de vida de módulos da planta alemã da First Solar, envolvendo a coleta e reciclagem no fim de vida útil. Os dados, expressos por metro quadrado de módulo, abrangem o consumo de produtos químicos, eletricidade, transporte, descarte e emissão de poluentes (SINHA; COSSETTE; MENARD, 2012).

A Tabela 7 apresenta a estimativa dos custos por m² de módulo, é válido ressaltar que, por ser baseada em alguns dados, provavelmente o custo do processo é maior. O consumo se obteve a partir do inventário, já o preço unitário foi retirado da literatura, como indicado na coluna de referências. Os custos por metro quadrado foram obtidos ao multiplicar o consumo pelo preço unitário.

Produtos químicos, energia, transporte e descarte, são considerados custos internos. No entanto, além desses, também existem custos da mão de obra, manutenção, operação, instalação, e amortização de equipamentos. No processo de reciclagem, os equipamentos utilizados são mencionados, como trituradores e moinho de martelos, entretanto, não há detalhes sobre o consumo, a operação e mão de obra envolvidas no processo, sendo necessário fazer uma estimativa.

O custo da energia industrial varia por país, estado e ano analisado. Por isso, o custo adotado nessa estimativa, vai ser a média da energia industrial em dois lugares. No primeiro semestre de 2024, a União Europeia registrou a energia por um preço médio de €0,1867/kWh (US\$0,21/kWh) (EUROSTAT, 2025), enquanto os EUA, em 2024, registrou um preço médio anual de US\$0,0815/kWh (EIA, 2025).

O estudo de Markert, Celik, Apul (2020), trata dos custos internos e externos do processo de reciclagem de módulos de c-Si. Nesse trabalho, é detalhado que o custo interno do processo é de US\$ 6,7/m², sendo que a maior parte desse valor é por conta do transporte e aterro sanitário, resultando em um custo de apenas US\$ 0,3/m² para as demais despesas (MARKERT; CELIK; APUL, 2020). Baseado nisso, e sabendo que, apesar do mó-

dulo de c-Si ser diferente do de CdTe, ambos passam por etapas semelhantes como trituração e lixiviação. Portanto, na ausência de dados específicos para o módulo de CdTe, será adotado o valor de US\$ 0,3/m², para os custos internos restantes.

Por fim, o inventário forneceu os dados sobre as emissões do cádmio para o ar e para a água, cujos danos compõem o custo ambiental, bem como dados sobre o descarte do processo de reciclagem. Os materiais residuais passam por tratamentos e, em seguida, são descartados, o plástico é destinado a incineração, enquanto o vidro é encaminhado ao aterro sanitário (SINHA; COSSETTE; MENARD, 2012).

Tabela 7 – Estimativa do custo da reciclagem.

Item	Consumo (unidade/m ²)	Preço estimado	Referência	Custo (US\$/m ²)
Energia	4,4kWh	US\$0,15/kWh	(EUROSTAT, 2025) (EIA, 2025)	0,66
Transporte	11,2 tonne*km	US\$0,16/tonne*km	(RAVILLA et al., 2024)	1,8
H2SO4	0,083kg	US\$0,16/kg	(RAVILLA et al., 2024)	0,0133
NaOH	0,1kg	US\$0,41/kg	(RAVILLA et al., 2024)	0,041
H2O2	0,57kg	US\$0,75/kg	(RAVILLA et al., 2024)	0,43
Outros custos internos	-	-	(MARKERT; CELIK; APUL, 2020)	0,3
Descarte	0,75kg	US\$0,0985/kg	(RAVILLA et al., 2024)	0,061
Custo ambiental	9,51x10 ⁻⁸ kg	-	(DELFT, 2025)	0,0000041
Custo total	-	-	-	3,25

Fonte: Próprio autor.

Após o processo de reciclagem e a refinação do “bolo” de semicondutor, recupera-se cerca de 90% do vidro e do CdTe em grau semicondutor para ser utilizado em outros módulos (CRSES, 2015). A receita refere-se à venda do semicondutor e do vidro. Em geral, o vidro representa entre 76 a 90% do peso do módulo (PADOAN et al., 2021), considerando o peso médio de 39kg do módulo e o preço de vidro reciclado, aproximadamente de US\$0,22/kg (MARKERT; CELIK; APUL, 2020), a receita gerada pela recuperação do vidro é de US\$2,48/m².

Já para o semicondutor, a estimativa da receita foi baseada nos preços dos elementos, de acordo com os dados da instituição científica *United States Geological Survey (USGS)*. O estudo de Padoan et al. (2021) apresenta a concentração dos elementos em vários tipos de célula, e, para essa estimativa, foi adotado que, em média, por quilograma de módulo de CdTe encontra-se uma fração de 350mg de cádmio e 380mg de telúrio (PADOAN et al., 2021). A partir disso, a receita estimada da recuperação dos semicondutores é de US\$0,35/m², resultando em uma receita total de US\$2,83/m².

Estudos que avaliam o ciclo de vida desses módulos indicam que essa tecnologia, em comparação com as demais disponíveis no mercado, apresenta menor impacto ambiental. Isso se deve ao fato do processo de fabricação demandar menos energia, com emissões

de cádmio relativamente baixas. No processo de reciclagem, essas emissões são ainda menores, devido ao programa de gestão da First Solar, onde o cádmio é gerenciado rigorosamente (FTHENAKIS et al., 2020).

3.4 Módulos de CIGS

O estudo feito por Ravilla et al. (2024) toma por base, para a análise econômica, três diferentes processos de reciclagem, o primeiro foi feito principalmente por separação mecânica, o segundo combina etapas mecânicas, hidrometalúrgicas e eletrodeposição na recuperação dos materiais valiosos como índio e gálio, e o terceiro inclui separação física, lixiviação ácida e separação individual dos metais.

O primeiro processo utilizou majoritariamente separação mecânica, o que minimizou o número de produtos químicos utilizados na etapa hidrometalúrgica. No início do processo, o módulo de CIGS vai ser triturado por moinho de martelo, resultando em pequenos pedaço que facilitarão a reciclagem do vidro. Em seguida, na etapa de redução dimensional, o módulo quebrado receberá a ação de um vácuo industrial que sugará a poeira contaminada do módulo. Após isso, os pedaços maiores serão enviados ao tambor rotativo, onde ocorrerá o processo de lixiviação do filme semicondutor utilizando o H_2SO_4 , que separará os metais (RAVILLA et al., 2024).

A lixiviação faz com que os metais fiquem suspensos no líquido, então esse módulo lixiviado é enviado para um extrator centrífugo que separará esse líquido do vidro. O vidro vai para uma peneira vibratória, onde será separado do encapsulante, e será lavado para retirar todos os resíduos do filme semicondutor, e após limpo está pronto para ir a uma unidade de reciclagem de vidro. Por fim, o líquido com metais é enviado para uma unidade de precipitação, o tratamento responsável por precipitar os metais será feito utilizando o $NaOH$. O resultado é uma espécie de lama, que é colocada numa prensa de filtro onde serão filtrados os resíduos e água, resultando em sólidos contendo os metais (RAVILLA et al., 2024).

O segundo processo inicia reduzindo o módulo em pequenos pedaços, através de um moinho de martelo. Esses pedaços serão levados a um tambor de lixiviação, onde são adicionados um surfactante não identificado, H_2SO_4 e H_2O_2 , que promovem a oxidação do Gálio e Índio. Na etapa de filtração e desnatamento, separa-se o vidro e EVA do líquido ácido, assim o vidro pode ser enviado para um centro de reciclagem de vidro e o EVA

para um aterro sanitário, após passar por uma instalação de descarte de resíduos. Esse processo tem como foco a recuperação do Selênio e dos metais preciosos Gálio e Índio, nesse estudo não foi apresentada a recuperação do cobre, mas ela poderia ser feita em etapas posteriores (RAVILLA et al., 2024).

Para a precipitação do Selênio, adiciona-se Dióxido de Enxofre (SO_2) na camada absorvedora da célula. Em seguida, através da adição de $NaOH$, o pH é ajustado para a extração do Índio. Após essa etapa, a solução deve ser filtrada para remover sólidos e os resíduos da lixiviação. Adicionam-se então Ácido Fosfórico di-(2-etilhexila) (D_2EPHA) e tolueno para formar um ácido orgânico de Índio, que é posteriormente desintegrado com HCl e passará por uma eletrodeposição, dessa forma é então extraído o Índio puro. Após a extração do Índio, adiciona-se novamente o $NaOH$ à solução, para ajustar o pH. Em seguida, o D_2EPHA e tolueno são adicionados e originam o ácido de Gálio orgânico, que será desintegrado com HCl formando o sal de Gálio, e através da eletrodeposição o Gálio sólido é extraído (RAVILLA et al., 2024).

No terceiro processo, o módulo é cortado em pedaços e mergulhado em nitrogênio líquido para separar o vidro do EVA, através da deformação térmica no EVA. Após essa etapa, o vidro irá para um centro de reciclagem de vidro e o EVA, após passar por uma instalação de descarte de resíduos, irá para um aterro sanitário. A camada absorvedora da célula é separada do EVA, utilizando HCl , à medida que passa por um processo térmico em atmosfera de oxigênio, na temperatura de $900^{\circ}C$. Esse processo térmico resulta na formação de óxidos, o Selênio e Enxofre oxidados ficam em forma gasosa, enquanto os óxidos de Cobre, Índio e Gálio serão submetidos à lixiviação com HNO_3 (RAVILLA et al., 2024).

Em seguida, adiciona-se o D_2EPHA à solução nítrica e assim serão extraídos os íons de Cobre, Índio e Gálio, que serão desintegradas com o HCl e precipitadas com Hidróxido de Amônio (NH_4OH), formando hidróxidos metálicos. Os hidróxidos passarão por uma etapa de calcinação, que transforma esses hidróxidos em óxidos metálicos, através das altas temperaturas. A partir dos óxidos metálicos, a taxa de recuperação dos metais Índio, Cobre e Gálio foi acima de 90% (RAVILLA et al., 2024).

3.4.1 Aspecto econômico e ambiental

O primeiro processo possui um custo privado de \$3,60 por m² de módulo reciclado, o custo externo total é \$3,04/m², resultando em custo total de \$6,64m²; a energia utilizada foi cerca de 0,19 kWh/m². A receita obtida, da venda do vidro e cobre recuperados, é de \$1,3/m². Esse custo interno está predominantemente relacionado ao custo do processo, por conta dos produtos químicos utilizados; já o que predomina o custo externo é o custo dos impactos ambientais causados pelo uso do H_2SO_4 e do $NaOH$. Devido ao autor nesse processo não se focar em recuperar os metais preciosos, que ficam na mistura de resíduos, o custo da reciclagem se torna muito maior do que a receita, mostrando um prejuízo de \$5,34/m² (RAVILLA et al., 2024).

O segundo processo possui um custo privado de \$4,24/m², o custo externo total é \$3,90/m², resultando em custo total de \$8,14m²; o maior custo do processo, em relação aos outros dois, é ocasionado pelo consumo de energia que foi cerca de 6,38 kWh/m². A receita obtida da venda dos produtos recuperados é de \$3,4/m². Para o custo interno predominou o custo dos produtos químicos utilizados no processo, já o custo externo vem majoritariamente do impacto ambiental causado pelos produtos químicos utilizados no processo como H_2SO_4 , $NaOH$, HCl e da eletricidade usada nas etapas de eletrodeposição. Nesse processo, são recuperados os metais preciosos Gálio e Índio, além do vidro, por isso apresenta uma receita maior que o primeiro processo, entretanto o custo total é muito maior, mostrando um prejuízo de \$4,74/m² (RAVILLA et al., 2024).

O terceiro processo possui um custo privado de \$3,70/m², o custo externo total é \$3,16/m², resultando em custo total de \$6,86m²; a energia utilizada foi cerca de 0.02 kWh/m², a menor dentre os três processos. A receita obtida da venda dos produtos recuperados é de \$3,6/m². Para o custo interno predominou o custo do transporte, enquanto o custo externo é proveniente principalmente do impacto ambiental pelo uso do HCl e do descarte de resíduos. Nesse processo, são recuperados o vidro, os metais preciosos Gálio e Índio e o Cobre. Em comparação com o segundo processo, esse possui um custo menor e uma receita de quase mesmo valor, resultando num menor prejuízo de \$3,26/m² (RAVILLA et al., 2024).

Vale destacar que, nenhum dos três processos analisados no estudo focaram em recuperar o alumínio, pois os módulos utilizados são sem moldura, esse material geraria uma receita considerável (RAVILLA et al., 2024). Apesar disso, a reciclagem para os módulos de

CIGS deve ser aprimorada, os custos privado e externo são altos para a receita obtida, é necessário recuperar muito mais que apenas alguns metais e o vidro para que a receita ultrapasse esses custos.

Poucos estudos abordam a viabilidade ambiental do processo de reciclagem dessa tecnologia. No entanto, é importante destacar que os químicos utilizados no processo, principalmente NaOH e HCl, são as principais causas do impacto ambiental (RAVILLA et al., 2024). No ciclo de vida do módulo de CIGS, desconsiderando a etapa de fim de vida, os valores médios da demanda cumulativa de energia e das emissões geradas são estimadas em 1248 MJ/m² e 63,21 Kg CO₂eq/m², respectivamente (MAALOUF et al., 2023). Para a recuperação de gálio e índio, considerando as etapas de coleta, reciclagem e descarte, as emissões podem chegar a 230 kg CO₂-eq/m² de módulo (XU et al., 2018). Um estudo comparativo ainda indicou que a reciclagem dessa tecnologia, em relação à de CdTe, apresenta maior impacto ambiental, devido a menor taxa de recuperação de metais (WANG; FENG; HE, 2024).

3.5 Módulos de DSSC

Reciclar essa célula não é simples, principalmente por conta de sua estrutura com a presença do eletrólito líquido. Atualmente, não existe um processo de reciclagem em escala industrial para DSSC. É mais importante, no momento, aumentar a expectativa de vida útil do módulo, para torná-lo mais viável comercialmente. A escassez de estudos na literatura representa um desafio; no entanto, os poucos trabalhos existentes destacam a importância de recuperar os materiais valiosos presentes, como a platina, o rutênio e o vidro.

Miettunen e Santasalo-Aarnio (2021), apontam que processos comuns em outros tipos de módulos não são viáveis para o de DSSC. O processo mecânico que, em geral envolve a separação dos componentes do módulo, através de etapas como trituração e moagem, não é viável para a DSSC. Isso ocorre porque, segundo o autor, os nanomateriais não vão se separar do substrato, através das etapas mecânicas (MIETTUNEN; SANTASALO-AARNIO, 2021).

Ademais, a concentração do vidro do substrato é muito maior que os nanomateriais valiosos, de modo que dificulta a separação das partes, tornando inviável reciclar ambos materiais. O processo pirometalúrgico é comumente utilizado para extrair metais, através

de altas temperaturas. No entanto, ele é inviável para a DSSC, pois o flúor e iodo, quando submetidos a altas temperaturas, geram gases poluentes atmosféricos. Além disso, o vidro não é incinerado no processo, o que aumenta o volume da escória, dificultando a recuperação dos metais presentes. Já o processo hidrometalúrgico, recupera metais através de soluções aquosas. Necessita de uma grande quantidade de reagentes químicos e, além disso, para recuperar os metais eficientemente, é preciso que os metais presentes tenham condições de precipitação diferentes, o que dificulta o processo (MIETTUNEN; SANTASALO-AARNIO, 2021).

3.6 Módulos de OSC

São consideradas tecnologia nova, com pesquisas em andamento, então existem poucos estudos acerca de sua reciclagem (NGAGOUM NDALLOKA et al., 2024). Essas células se inserem no mercado com a promessa do baixo custo de fabricação, em comparação às células de semicondutores inorgânicos, pois são constituídas por materiais que não precisam de grande uso de energia, o que leva a necessidade de estudos e testes para a sua aprimoração. Como abordado anteriormente, essa célula utiliza o ITO como o TCO e, assim como nos outros tipos de célula, há uma preocupação por conta da baixa concentração de índio no planeta, reforçando a necessidade da reciclagem nos módulos em fim de vida. No entanto, até o momento, não existem processos de reciclagem para essa célula amplamente adotados em escala industrial (ANTOLIN et al., 2025).

Alguns estudos propõem métodos de reciclagem para outras configurações de OSC, utilizando células que não apresentam uma eficiência tão alta como as de BHJ, reforçando a necessidade de estudos para que as OSC avancem e atinjam amplamente uma escala comercial. Zhou et al. (2013) apresentou um processo de reciclagem para uma célula que utiliza o substrato de nanocristais de celulose. O substrato, desse tipo de célula, é facilmente dissolvido em água e, após isso ocorrer, a estrutura da célula se separa. Dessa forma, após adicionar um solvente orgânico, vai ser possível filtrar os materiais orgânicos e metálicos (ZHOU et al., 2013).

Já Søndergaard et al. (2016) demonstrou a recuperação de 100% da prata presente no eletrodo da célula, através da incineração a temperaturas entre 800° e 1000°. As cinzas resultantes passam por um tratamento químico que permite a extração da prata. É válido citar que, antes da incineração, o módulo é cortado em pequenos pedaços para facilitar o

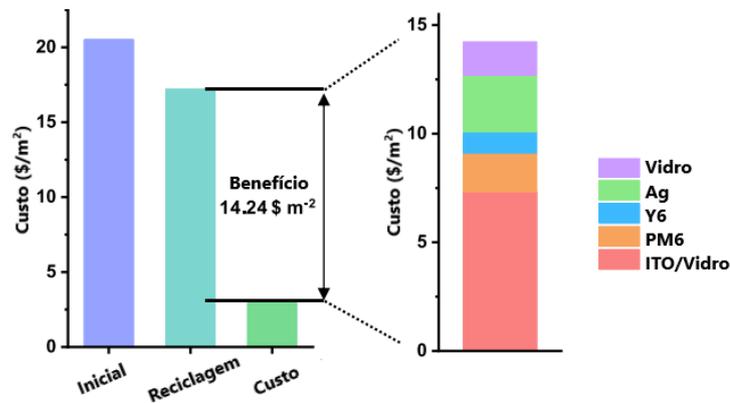
processo (SøNDERGAARD et al., 2016).

Sun et al. (2024) propôs um processo de reciclagem para os módulos com células BHJ, que utiliza vidro como substrato, PM6 e Y6 como camada ativa, a prata como contato metálico, o PFN-Br como ETL e o PEDOT:PSS como HTL. O processo inicia separando os componentes do módulo, através do aquecimento, numa etapa chamada de delaminação térmica. Essa etapa, resulta na recuperação do vidro e substrato da célula. Para separar as camadas da célula, vai ser usado o tolueno como solvente não halogenado, removendo a camada ativa, a ETL e o eletrodo de prata. Após a separação, o estudo destacou a viabilidade da etapa de cromatografia em coluna, que separa os materiais da camada ativa, resultando em PM6 e Y6 de alta pureza. A prata pode ser recuperada como cloreto de prata e, após reagir com amônia aquosa, resulta em prata de alta pureza. O ITO e o vidro passaram por etapas para serem recuperados, através de solventes como água, isopropanol e acetona para remover resíduos, como o PEDOT:PSS (SUN et al., 2024).

3.6.1 Aspecto econômico

Segundo Sun et al. (2024), a recuperação de prata e do ITO atinge quase 100%, com receitas de \$2,62 e \$7,33 por m² de módulo, respectivamente. A recuperação do PM6 foi de 84,2%, enquanto o Y6 foi de 73,5%. A Figura 24 compara o custo inicial para a fabricação (\$20,6/m²), a receita obtida do processo de reciclagem (\$16,86/m²) e o seu custo (US\$2,62/m²); o lucro, ou benefício, obtido foi de \$14,24/m². Vale ressaltar que no custo da reciclagem foram inseridos os valores dos materiais utilizados no processo, no entanto não estão inclusos valores de mão de obra e do maquinário, uma vez que trata-se de um teste experimental (SUN et al., 2024).

Figura 24 – Análise econômica da reciclagem.



Fonte: Adaptado de (SUN et al., 2024).

3.7 Módulos de Perovskita

O processo de reciclagem desses módulos ainda está em pesquisa e desenvolvimento, pois se estuda retirar o chumbo da estrutura da célula. Dentre as pesquisas realizadas para a reciclagem do módulo de Pb-H descartado, o estudo de Hyunmin Oh, Jongil Bae e Jeehoon Han (2025) aborda a reciclagem do Iodeto de Chumbo (PbI_2), que após ser recuperado pode ser reutilizado. Existem diferentes métodos de reciclagem para essa célula, como adsorção, extração e métodos eletroquímicos, entretanto o método eletroquímico não é muito viável pois utiliza muita energia o que encarece o processo.

No método da extração com água, apesar de ecologicamente correto, envolve o processo de trituração do módulo o que ocasiona a perda de outros materiais, não permitindo sua recuperação. Nesse método ocorre a lixiviação do PbI_2 em água quente, em torno de 50°C, e posteriormente a sua cristalização quando a temperatura cai para 20°C, atingindo uma eficiência de reciclagem de 89,7%, sendo inferior ao do método de adsorção (OH; BAE; HAN, 2025).

No método de adsorção, além do PbI_2 , após a delaminação do módulo recupera-se o ITO e o vidro. O processo possui 3 etapas, primeiro o PbI_2 é lixiviado pelo solvente Dimetilformamida (DMF), de forma que o íon de Pb^{2+} é separado dele utilizando um adsorvente de Hidroxiapatita dopada com Ferro (HAP/Fe). O complexo $Pb^{2+} - HAP/FE$ é dissolvido no ácido nítrico (HNO_3) e, por fim adiciona-se Iodeto de Sódio (NaI) que permite a precipitação do PbI_2 , dessa forma o PbI_2 reciclado apresenta uma taxa de recuperação quase de 100%. O adsorvente HAP/Fe, apesar de ecologicamente correto, é dissolvido

no ácido nítrico, não podendo ser reutilizado e exigindo sempre uma nova aquisição do mesmo, encarecendo o processo. O método de adsorção pode seguir o mesmo processo porém utilizando um adsorvente reutilizável, a Resina Catiônica de Ácido Fraco (WAC), em comparação à HAP/Fe, essa alternativa reduz o custo do método e atinge uma eficiência de reciclagem de 99,2% (OH; BAE; HAN, 2025).

3.7.1 Aspecto econômico e ambiental

O estudo de Oh, Bae, Han (2025) analisa a viabilidade econômica e ambiental, considerando a quantidade de resíduos de PSCs sendo de 20000 toneladas por ano. A análise, para ambos aspectos, foi feita com base em 1m² de área de PSC processada, incluindo o custo operacional da reciclagem até chegar aos materiais recuperados. Em comparação às emissões para a produção dos materiais recuperados, cerca de 16,85 kg CO₂-eq, os três processos de reciclagem emitiram uma quantidade menor de gases efeito estufa (OH; BAE; HAN, 2025).

O método de extração com água, apesar de não utilizar solventes caros e ter um processo mais simples, é economicamente inviável. A receita do processo de reciclagem foi de 2,88 US\$/m², enquanto que o custo do processo de reciclagem foi de 5,35 US\$/m². A emissão de gases foi cerca de -0,04 kg CO₂-eq, se mostrando ambientalmente correto (OH; BAE; HAN, 2025).

O método de adsorção por HAP/Fe, não é economicamente viável, pois, apesar do retorno financeiro com o PbI_2 , ITO e o vidro, o principal custo vem do DMF, que não pode ser reutilizado assim como o HAP/Fe. A receita do processo de reciclagem foi de 12,01 US\$/m², enquanto que o custo do processo de reciclagem foi de aproximadamente 458,86 US\$/m². A emissão de gases foi de 3,65 kg CO₂-eq (OH; BAE; HAN, 2025).

Já o método de adsorção utilizando a WAC é economicamente viável, nesse, como o principal fator de viabilidade, não há o alto consumo do DMF. A receita do processo de reciclagem foi de 11,98 US\$/m², enquanto que o custo do processo de reciclagem foi de 9,44 US\$/m². A emissão de gases foi de 0,20 kg CO₂-eq (OH; BAE; HAN, 2025).

3.8 Panorama da Reciclagem no Brasil

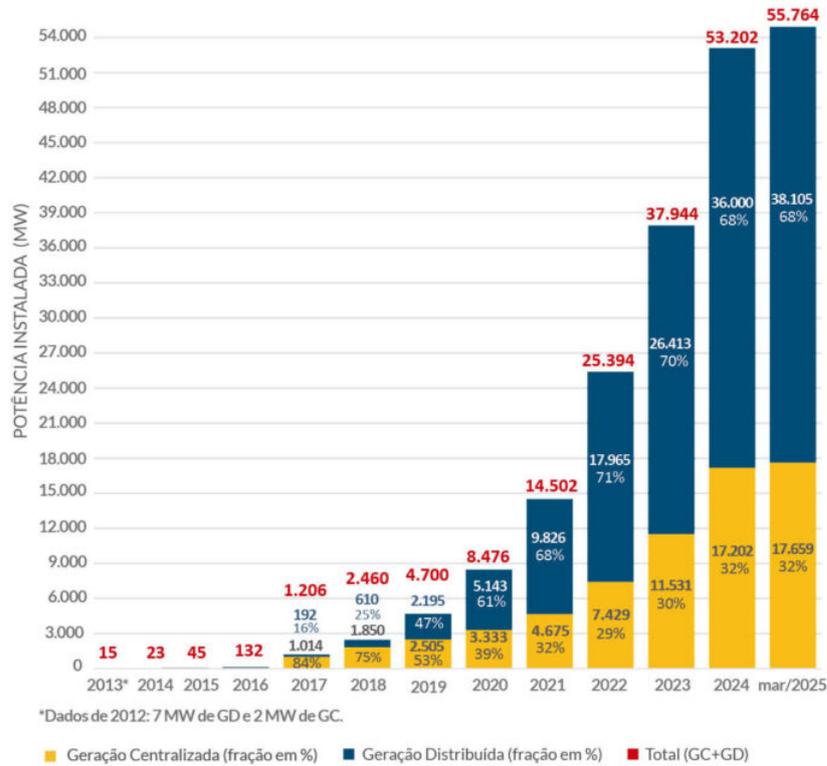
Esta seção apresenta uma estimativa de descarte dos módulos no cenário brasileiro, servindo de base para a análise da viabilidade da reciclagem em um dos tópicos do capítulo 4.

O Brasil se destaca entre os seis países com maior capacidade instalada de energia fotovoltaica, como visto anteriormente, e a matriz segue crescendo. Entretanto, esse crescimento precisa estar acompanhado de políticas que impulsionem o mercado da reciclagem dos módulos. A partir de incentivos e obrigações legislativas, que tratem da recuperação dos resíduos fotovoltaicos, o crescimento dessa energia renovável poderá evitar um grande impacto ao meio ambiente.

A Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) corresponde à geração de energia em pequenas instalações, situadas no local de consumo ou próximo a ele, como residências e comércios. Já a Geração Centralizada (GC) refere-se à geração em grandes usinas, geralmente localizadas distantes dos centros de consumo. Atualmente, a energia solar fotovoltaica corresponde a 22,5% da matriz elétrica brasileira, ficando atrás apenas da hidrelétrica (ANEEL/ABSOLAR, 2025). Dentro dessa participação, a MMGD é predominante em relação à GC (ANEEL/ABSOLAR, 2025). A Figura 25 apresenta essa diferença e mostra a evolução da potência ou capacidade instalada ao longo dos anos.

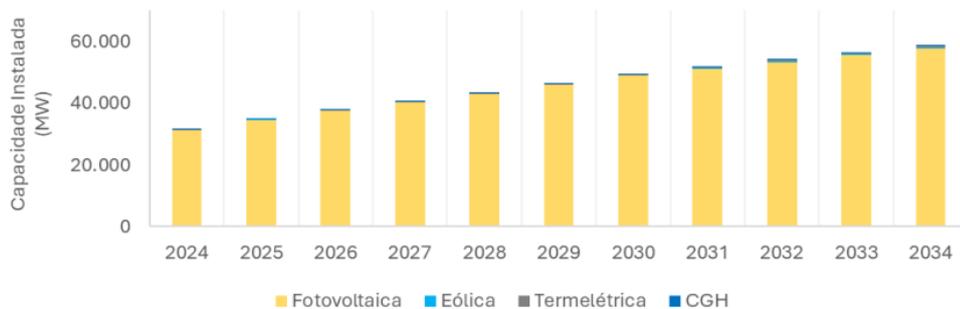
Nesse cenário, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2034 estima que, até 2034, a MMGD acrescentará aproximadamente 27 GW de potência instalada. A Figura 26 apresenta essa estimativa de expansão para as fontes da matriz energética brasileira e evidência como a tecnologia fotovoltaica é dominante neste segmento, responsável por cerca de 98% da expansão, que corresponde a aproximadamente 26,64 GW. Já para as usinas fotovoltaicas na GC, estima-se um incremento de cerca de 13,15 GW (EPE, 2024).

Figura 25 – Evolução da potência instalada no Brasil.



Fonte: (ANEEL/ABSOLAR, 2025).

Figura 26 – Expansão em capacidade da MMGD no Brasil.



Fonte: (EPE, 2024).

3.8.1 Legislação brasileira

No Brasil, até o presente momento, não existem leis que incentivem ou regulem a reciclagem dos resíduos fotovoltaicos. Entretanto, destacam-se alguns projetos de leis em tramitação, que têm o objetivo de obrigar e incentivar a reciclagem e o descarte adequado. Esses projetos trazem o conceito de logística reversa.

Logística reversa: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

O projeto de lei nº 3.784/2023 busca incluir, no artigo 33 da lei nº 12.305/2010, os “painéis solares fotovoltaicos e seus componentes”. Se o projeto de lei for aprovado, de acordo com a lei nº 12.305/2010, terão por obrigação os “fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de painéis solares e seus componentes” de implementar “sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos” (BRASIL, 2010). Segundo esse projeto de lei, com o aumento da capacidade instalada no Brasil, a reciclagem das placas solares é essencial,

A reciclagem reduz a quantidade de materiais valiosos que são descartados em aterros sanitários e possibilita o reaproveitamento das matérias-primas na fabricação de novos painéis, tornando a energia solar ainda mais sustentável e barata (BRASIL, 2023).

Já o projeto de lei nº 998/2024,

Institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento de Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, com o objetivo de impulsionar a pesquisa, a inovação tecnológica e a implementação dos processos de reaproveitamento, reciclagem e disposição final ambientalmente adequada dos seus componentes, assegurando a sustentabilidade ambiental da expansão da geração de energia elétrica renovável de fonte solar (BRASIL, 2024).

Esses projetos de lei são de extrema importância para o crescimento do mercado de reciclagem no Brasil. A política de incentivo pode impulsionar o desenvolvimento tecnológico de empresas nacionais, o que seria fundamental para o país. Na ausência de infraestrutura própria, o descarte indevido tenderia a ser a solução mais prática, já que o envio de módulos para empresas recicladoras estrangeiras tornaria o processo inviável e aumentaria o custo do processo de reciclagem.

3.8.2 Estimativa de descarte

Por conta da predominância na produção global dos módulos de c-Si, principalmente os monocristalinos, essa tecnologia será considerada como predominante no mercado brasileiro para esta estimativa. A partir das projeções de capacidade instalada do PDE, este tópico apresentará uma estimativa do descarte de módulos no Brasil. Diversos fatores envolvem o descarte dos módulos em um país: as regiões e estados possuem climas distintos, consumos e demandas diferentes, além de práticas de manutenção diferentes, que impactam significativamente a durabilidade e volume real de resíduos gerados; ressalta-se, portanto, a limitação da estimativa.

Em 2023, a China representou cerca 86% da produção global de módulos fotovoltaicos (PHILIPPS; WARMUTH, 2024). Segundo a Greener (2024), no estudo sobre a geração distribuída, dentre as dez marcas que importam módulos ao Brasil, nove são chinesas (GREENER, 2024). Além disso, segundo a ABSOLAR, as empresas montadoras de módulos no Brasil não suprem nem 5% do mercado nacional (FOTOVOLT, 2024). Diante da grande influência de empresas chinesas, tanto no contexto global quanto nacional, no que refere-se à fabricação e exportação de módulos, nesta estimativa serão considerados os estágios de evolução tecnológica dos módulos adotado pela indústria chinesa.

Antes de 2010, os módulos na China não chegavam a uma vida útil de 25 anos. Com os incentivos decorrentes de políticas internas implementadas entre 2009 a 2013, inaugurou-se um estágio importante, compreendido entre 2010 e 2022, no qual foram asseguradas a eficiência, a vida útil e a qualidade dos módulos. A partir de 2022, inicia-se outro estágio de desenvolvimento no país; as empresas nacionais se consolidaram como grande produtoras, oferecendo módulos de melhor qualidade, além de uma estimativa de vida útil em torno de 40 anos (WANG et al., 2025).

De acordo com Rosales (2023) “A análise de *Weibull* é um método estatístico utilizado na engenharia de confiabilidade e manutenção para analisar dados de vida útil, taxas de falhas e confiabilidade de equipamentos”. Diante da necessidade de calcular a probabilidade de falhas dos módulos fotovoltaicos, a estimativa será realizada para o cenário de perda regular e perda antecipada, utilizando a função *Weibull*:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.1)$$

em que t representa a vida útil dos módulos, $F(t)$ é a taxa cumulativa de falhas, β é o

parâmetro de forma, que representa a tendência da taxa de falhas, e η representa a vida útil.

Para fins estimativos, no cálculo das falhas dos módulos, consideram-se dois cenários: o regular, no qual o módulo se desgasta naturalmente com o tempo e envelhecimento; e o antecipado, no qual o descarte ocorre por mau funcionamento, perdas no transporte, defeitos na produção ou mesmo na instalação.

Além disso, com base na utilização predominante de módulos da China no Brasil, adota-se, para esta estimativa, os mesmos estágios tecnológicos definidos para a China: o estágio de 2010 a 2022 será referido como estágio A, e o a partir de 2022, como estágio B. De acordo com a literatura, no estágio A a vida útil típica dos módulos é menor que 30 anos; enquanto que para o estágio B a vida típica útil antecipada e regular é de 35 anos (WANG et al., 2025).

De acordo com a literatura, para cada estágio são definidas a proporção de falha nos cenários regular e antecipado, bem como os parâmetros da função *Weibull*, no qual modificam a curva da taxa de falha. A Tabela 8 apresenta essas informações (WANG et al., 2025).

Tabela 8 – Parâmetros Weibull e Proporção de módulos.

Parâmetro	A (2010-2022)		B (2022 em diante)	
	Falha antecipada	Falha regular	Falha antecipada	Falha regular
β	9,98	14,41	2,49	5,38
η	27,48	27,98	35	35
Proporção de módulos	20 (%)	80 (%)	10 (%)	90 (%)

Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2025).

Os dados de capacidade instalada nacional utilizados no cálculo dos resíduos constam na Tabela 9. Como a estimativa é incerta, as adições de capacidade instalada do PDE foram distribuídas linearmente no período de 2025-2034 para facilitar a aplicação do modelo, embora traga limitações. Os 26,64 GW da MMGD e 13,15 GW da GC, totalizam 39,79 GW distribuídos igualmente em 10 anos. Após obter da equação 3.1, a fração de módulos que falham em cada ano, essa fração é aplicada à capacidade instalada adicionada no respectivo ano, resultando na quantidade de módulos descartados, expresso em potência.

É necessário converter os dados de potência para o peso dos módulos. Essa conversão será feita através da equação:

$$M_i = \sum_{i=1}^n R_i W_i \quad (3.2)$$

Tabela 9 – Capacidade instalada no Brasil (MW).

Ano	Capacidade instalada (MW)	Acréscimo previsto (MW)	Capacidade instalada (MW)
2010	0,1	-	0,1
2011	5,3	-	5,3
2012	7,32	-	7,32
2013	15	-	15
2014	23	-	23
2015	45	-	45
2016	132	-	132
2017	1.206	-	1.206
2018	2.460	-	2.460
2019	4.700	-	4.700
2020	8.476	-	8.476
2021	14.502	-	14.502
2022	25.394	-	25.394
2023	37.944	-	37.944
2024	53.202	-	53.202
2025	-	3.979	57.181
2026	-	3.979	61.160
2027	-	3.979	65.139
2028	-	3.979	69.118
2029	-	3.979	73.097
2030	-	3.979	77.076
2031	-	3.979	81.055
2032	-	3.979	85.034
2033	-	3.979	89.013
2034	-	3.979	92.992

Fonte: Adaptado de (ANEEL/ABSOLAR, 2025)(PESSOA; GALO, 2023).

onde M_i é o peso dos módulos descartados gerados no ano i , R_i é a relação peso/potência e W_i é a quantidade esperada de módulos descartados no ano i , medido em potência. A relação R_i , é obtida da literatura e consta na Tabela 10; para o ano de 2010, será utilizado o mesmo R_i de 2011, considerando que a capacidade instalada nesse ano é quase insignificante.

A partir do modelo apresentado, a Figura 27 apresenta a estimativa anual de resíduos, enquanto a Figura 28 apresenta o acúmulo de resíduos ao longo do tempo; em ambos os casos, o eixo y corresponde ao M_i da equação 3.2. É válido ressaltar que se trata de uma estimativa baseada em um método probabilístico de descarte de módulos, portanto é limitada em relação à realidade. O objetivo dessa estimativa é analisar a possível quantidade

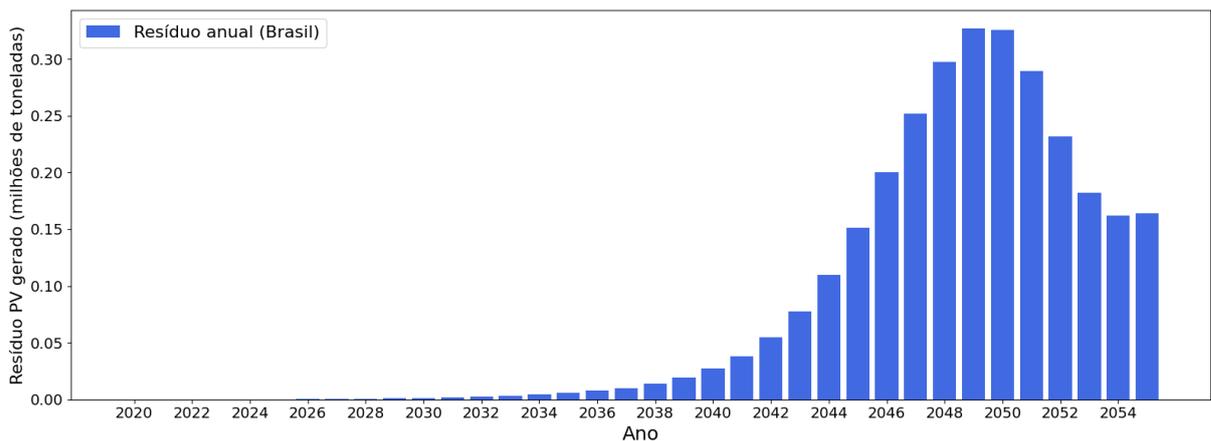
de módulos descartados. Observa-se que, até 2055, o acúmulo de resíduos pode alcançar 3 milhões de toneladas, o que corresponde a aproximadamente 150 milhões de módulos fotovoltaicos, evidenciando o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil, bem como a necessidade de lidar de forma sustentável com esses resíduos.

Tabela 10 – Relação peso-potência.

Ano	Ri (t/MW)
2011-2015	95
2016-2020	70
2021-2025	65
2026 em diante	60

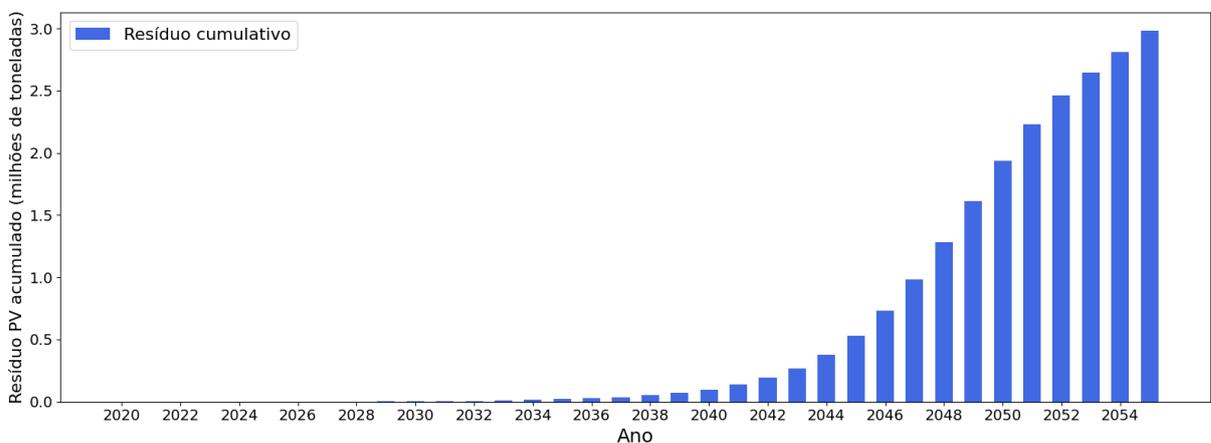
Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2025).

Figura 27 – Estimativa anual de resíduos fotovoltaicos no Brasil.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Estimativa de resíduos fotovoltaicos acumulados no Brasil.



Fonte: Próprio autor.

4 VIABILIDADE

A partir das informações apresentadas nos capítulos anteriores, torna-se possível fazer uma análise sobre a viabilidade da reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Devido à sua predominância na produção global, o foco deste trabalho recai sobre o módulo de c-Si, cuja reciclagem demonstra bastante relevância, tanto no ponto de vista ambiental quanto econômico. Os módulos de segunda geração, por sua vez, apresentam um menor espaço no mercado, reflexo de sua menor eficiência e da necessidade de avanços tecnológicos que permitam tanto a melhoria de desempenho quanto a viabilidade econômica de sua recuperação. Já as tecnologias de terceira geração, por estarem em desenvolvimento e pesquisa, demonstram um possível potencial de evolução, e, com o avanço da tecnologia, a viabilidade da recuperação poderá aumentar significativamente. A Tabela 11 resume os dados apresentados no capítulo anterior.

Tabela 11 – Análise econômica da reciclagem (valores em US\$/m²).

Tecnologia	Custo	Receita	Lucro	Prejuízo
Silício cristalino (c-Si)	12,430	13,620	1,190	–
c-Si (com 25% mais prata)	12,430	16,220	3,790	–
CdTe	3,250	2,830	–	0,420
CIGS – Processo 1	6,640	1,300	–	5,340
CIGS – Processo 2	8,140	3,400	–	4,740
CIGS – Processo 3	6,860	3,600	–	3,260
OSC	2,620	16,860	14,240	–
Perovskita – Método com água	5,350	2,880	–	2,470
Perovskita – Adsorção HAP/Fe	458,860	12,010	–	446,850
Perovskita – Adsorção WAC	9,440	11,980	2,540	–

Fonte: Próprio autor.

4.1 Primeira geração

Observa-se que os módulos de c-Si apresentam lucro, que poder ser ainda maior com o aumento da recuperação da prata, evidenciando a viabilidade do processo no aspecto econômico. Além disso, o processo contribui com uma redução significativa de emissões de CO_2 , ao utilizar materiais reciclados na fabricação de novos módulos, em comparação

à produção com materiais virgens. Apesar do alto custo do processo, os benefícios econômicos e ambientais são significativos, sobretudo por se tratar da tecnologia de módulo dominante no mercado.

4.2 Segunda geração

Em contraste, as tecnologias de segunda geração não apresentam viabilidade econômica. Por se tratarem de módulos de filme fino, compostos majoritariamente por vidro, a receita obtida não é expressiva; o material semiconductor recuperado não é suficiente para cobrir o custo do processo e torná-lo promissor. Portanto, aprimoramentos são necessários em todos os segmentos dessas tecnologias. No caso dos módulos de a-Si, a própria tecnologia vem perdendo espaço no mercado e sequer apresenta um processo de reciclagem que possa se tornar promissor do ponto de vista econômico.

4.2.1 CdTe

A tecnologia de CdTe é, atualmente, a dominante entre os módulos de filme fino. Apesar disso, seu processo de reciclagem ainda não é viável economicamente. De acordo com estudos, devido à maior parte do módulo ser constituída de vidro e à baixa concentração de metais valiosos, a reciclagem desse módulo não é economicamente atrativa, pois a receita obtida da recuperação não é suficiente para cobrir os custos do processo (YU et al., 2022). Como consta na Tabela 11, o custo estimado não é tão elevado quanto o das demais tecnologias; entretanto o valor real pode ser significativamente maior, assim como a receita. Ainda assim, a literatura destaca inviabilidade econômica da reciclagem.

No aspecto ambiental, a recuperação de mais de 90% do material semiconductor e do vidro, indica uma viabilidade ambiental ao evitar a extração de materiais virgens, como o telúrio, que enfrenta o problema da escassez. Além disso, estudos indicam que a reciclagem evita emissões, associadas ao cádmio, que poderiam ocorrer em caso de descarte em aterros ou incineradores (FTHENAKIS et al., 2020). As emissões do processo de reciclagem são menores que as da fabricação do módulo; de modo geral, a tecnologia apresenta baixo impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida (FTHENAKIS et al., 2020).

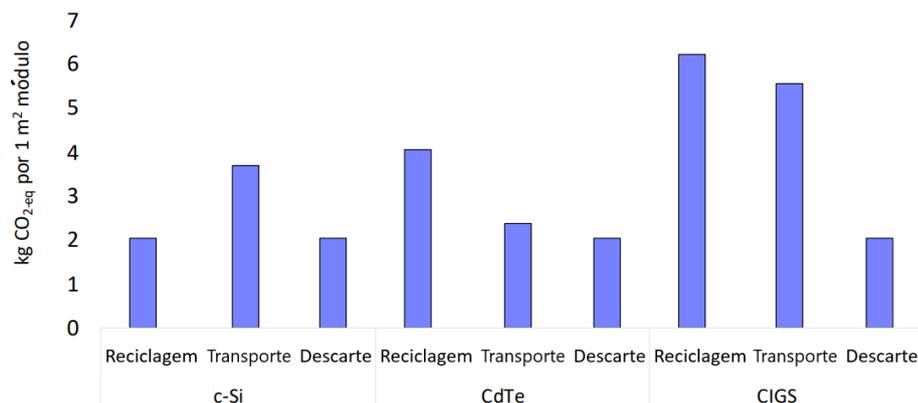
4.2.2 CIGS

Os processos analisados para os módulos de CIGS resultaram em prejuízo devido ao elevado custo operacional e à baixa receita. O primeiro processo recuperou vidro e cobre mas não incluiu etapas adicionais que permitissem a recuperação do material semicondutor presente na mistura de resíduos; por isso, a receita obtida não foi suficiente para cobrir o custo do processo. O segundo e o terceiro processos apresentaram recuperação do vidro e dos metais como gálio e índio, resultando em uma receita maior, porém ainda insuficiente para cobrir os custos, o que evidencia a inviabilidade econômica do processo.

No aspecto ambiental, embora a recuperação de materiais no processo seja um fator positivo, as quantidades pouco significativas recuperadas tornam difícil a análise da viabilidade para os dois primeiros processos, especialmente ao se considerar a substituição de materiais virgens por reciclados. Já o terceiro processo apresenta um alto índice de recuperação dos metais, demonstrando uma possível viabilidade ambiental ao evitar a extração de recursos naturais.

No entanto, é importante destacar que a avaliação ambiental não depende apenas da recuperação de materiais, mas também do consumo de energia, das emissões geradas e dos produtos químicos utilizados no processo. Com base no que foi indicado pela literatura disponível, a reciclagem dessa tecnologia apresenta um impacto ambiental considerável, sugerindo uma inviabilidade ambiental. A Figura 29 apresenta um comparação média das emissões geradas pelos módulos de CIGS, CdTe e c-Si no fim de vida, sendo possível notar que as emissões dos módulos de CIGS são maiores, evidenciando o impacto ambiental causado por sua reciclagem.

Figura 29 – Emissões geradas por módulos no fim de vida.



Fonte: Adaptado de (CELIK et al., 2020).

4.3 Terceira geração

Apesar das limitações dos testes laboratoriais, a reciclagem para as tecnologias de terceira geração são promissoras para a OSC e PSC. Essas tecnologias apresentam configurações distintas das utilizadas em módulos das gerações anteriores, de modo que as etapas convencionais do processo de reciclagem não são aplicáveis a elas. Atualmente, o módulo de DSSC não apresenta um processo de reciclagem viável devido aos problemas relacionados à estrutura da célula.

No caso da tecnologia OSC, o teste laboratorial de reciclagem apresentou baixo custo de processo; entretanto, não foram considerados fatores que poderiam elevar esse custo, como mão de obra e maquinário. Dessa forma, a configuração analisada apresentou lucro, devido à alta receita obtida. Além disso, verificou-se que, apesar do baixo custo de produção dessa tecnologia, é mais viável economicamente produzir módulos a partir dos materiais reciclados do que a partir de materiais virgens. Esse resultado evidencia o potencial do processo de reciclagem para esse tipo de módulo.

Os métodos testados para o módulo de PSC apresentam resultados distintos, e todos apresentaram viabilidade ambiental. O processo de extração com água, apesar de ecologicamente mais favorável, não gera receita suficiente por conta da perda de materiais, tornando necessário recorrer a métodos que utilizem solventes químicos. O método de adsorção com o solvente HAP/Fe eleva drasticamente o custo do processo, tornando-o inviável. Por outro lado, o método com o solvente WAC apresenta uma receita superior ao custo, demonstrando viabilidade econômica. Além disso, nos métodos de adsorção recupera-se vidro e ITO, que é de extrema importância, aumentando a receita e não gerando desperdícios. Os processos apresentaram viabilidade ambiental, mostrando que apesar da utilização de químicos, a reciclagem polui menos que a produção de materiais virgens. Considerando que essa tecnologia vem se destacando por apresentar altas eficiências, caso alcance maior participação no mercado, é fundamental que disponha de um processo de reciclagem viável que recupere a maior parte de materiais possíveis dos módulos e evite emissões de gases.

4.4 Cenário nacional

A partir dos dados médios obtidos para o processo de reciclagem, incluindo a emissão evitada, a energia poupada e o lucro gerado, é possível aplicar um exemplo prático da viabilidade, considerando a estimativa de descarte de cerca de 3 milhões de toneladas de módulos, como apresentado na Tabela 12. No aspecto econômico, levando em conta módulos de c-Si com área de 1,7 m², analisa-se os cenários de menor e maior recuperação da prata. No capítulo anterior, foi relatado que o processo de reciclagem, por uma tonelada de módulo, evita a emissão de cerca de 4317 a 4796 kg CO₂-eq e economiza 39790 a 46400 MJ de energia. Para a análise, adota-se a média desses valores: 4556,5 kg CO₂-eq/t e 43095 MJ/t.

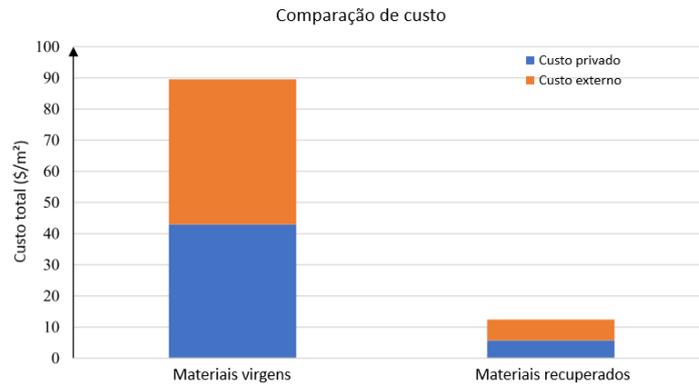
Tabela 12 – Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem no Brasil.

Aspecto	Tipo de benefício	Benefício estimado
Econômico	Lucro de US\$ 1,19/m ²	US\$ 303,45 milhões
	Lucro com acréscimo de Ag US\$ 3,79/m ²	US\$ 966,5 milhões
Ambiental	CO ₂ evitado	13,67 Mt CO ₂ -eq
	Energia poupada	129 300 TJ

Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que o aspecto ambiental considera as emissões evitadas ao considerar a fabricação de novos módulos a partir dos materiais reciclados, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade. A Figura 30 apresenta uma comparação entre os custos dos materiais virgens, extraídos da crosta terrestre para a fabricação dos módulos fotovoltaicos, e o custo dos materiais recuperados por meio da reciclagem, que podem ser reutilizados para a fabricação de novos módulos. A estimativa do custo dos materiais virgens é cerca de \$90/m², enquanto a produção de novos módulos a partir dos materiais recuperados custaria apenas \$1,19/m², evidenciando a grande vantagem econômica da reciclagem (PREET; SMITH, 2024).

Figura 30 – Comparação de custos entre materiais virgens e recuperados.



Fonte: Adaptado de (PREET; SMITH, 2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a viabilidade da reciclagem de módulos fotovoltaicos, com ênfase nos módulos de c-Si, tecnologia predominante no mercado. Os resultados demonstraram uma alta viabilidade econômica e ambiental para essa tecnologia. Esse desempenho reforça a justificativa para adoção da geração fotovoltaica como uma fonte limpa, sobretudo porque a recuperação de materiais da reciclagem evita a produção de módulos a partir de materiais virgens, processo que utiliza muita energia e gera emissões significativas, reduzindo, assim, os custos adicionais e a liberação de CO_2 . Diante do cenário da rápida expansão da energia fotovoltaica no mundo, torna-se essencial que os países adotem estratégias que incentivem a reciclagem, assegurando que os resíduos fotovoltaicos previstos para descarte recebam os devidos tratamentos, condizentes com a preservação ambiental.

Os módulos de filme fino ocupam uma pequena parcela do mercado, sendo mais destinados a aplicações específicas que exigem flexibilidade. Ainda assim, geram uma quantidade de resíduos fotovoltaicos que não deve ser negligenciada. Atualmente, a reciclagem dessa tecnologia é economicamente inviável e não é aplicada em larga escala, uma vez que a composição do módulo não permite gerar uma receita suficiente para cobrir o custo do processo. Enquanto as novas tecnologias não substituam as atuais, serão necessários incentivos e novos testes laboratoriais que aprimorem o tratamento do fim de vida desses módulos. Isso é especialmente relevante para os módulos de CIGS, que vêm perdendo espaço no mercado devido ao alto custo da tecnologia, e além disso, não apresentam viabilidade de reciclagem. Já para os módulos de CdTe, dominantes no mercado de filmes finos, são necessárias melhorias no processo de reciclagem com o objetivo de reduzir custos e, assim, garantir sua viabilidade tanto econômica quanto ambiental.

Das três tecnologias de terceira geração analisadas, apenas a PSC demonstra potencial tanto para se consolidar no mercado, em razão de suas altas eficiências, quanto pela viabilidade da reciclagem. É relevante que uma tecnologia promissora, ainda em estágio de desenvolvimento, já apresente um processo de reciclagem viável economicamente e ambientalmente.

Os módulos de OSC, apesar de possuírem uma composição de materiais mais simples, o que torna o seu custo de produção baixo, apresentaram, em testes laboratoriais,

uma receita elevada o suficiente para cobrir os custos, garantindo assim sua viabilidade econômica. Essa tecnologia enfrenta alguns problemas estruturais, como a degradação por umidade, entretanto pesquisas e testes futuros podem aprimorar esses aspectos, tornando a sua aplicação comercial mais viável.

Por fim, a tecnologia DSSC necessita de alterações em sua configuração, além de apresentar uma baixa eficiência, possui uma estrutura complexa que dificulta a aplicação de processos de reciclagem. No caso de impossibilidade da reciclagem, é fundamental que novos materiais possam substituir aqueles potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, bem como os materiais valiosos, como a platina e o rutênio, cuja recuperação apresenta importância tanto econômica quanto ambiental.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a reciclagem dos módulos garante a sustentabilidade na utilização da energia solar fotovoltaica. Os países devem adotar políticas que fomentem o processo, por meio de legislações que obriguem o tratamento adequado dos resíduos e de incentivos que impulsionem o desenvolvimento tecnológico na área. Além disso, como evidenciado ao longo do trabalho, muitas tecnologias empregam elementos potencialmente nocivos ao meio ambiente, sendo fundamental o incentivo a pesquisas e testes voltados à substituição desses materiais por alternativas mais sustentáveis.

Referências

- ABSOLAR. *Brasil sobe 2 degraus e atinge 6º lugar no ranking Irena de capacidade solar instalada*. 2024. Acessado em: 18/01/2025. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-bol-uol-com-br-noticias-2024-04-08-brasil-sobe-2-degraus-e-atinge-6-lugar-no-ranking-irena-de-capacidade-solar-instalada-htm/>>.
- AL-ALI, S.; OLABI, A. G.; MAHMOUD, M. A review of solar photovoltaic technologies: developments, challenges, and future perspectives. *Energy Conversion and Management: X*, v. 27, p. 101057, 2025. ISSN 2590-1745. Acessado em 16/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525001898>>.
- ANEEL/ABSOLAR. *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo*. 2025. Acessado em 19/05/2025. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>.
- ANTOLIN, E.; URIETA-MORA, J.; MOLINA-ONTORIA, A.; MARTÍN, N. Organic solar cells: Principles, materials, and working mechanism. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, v. 76, p. 101893, 2025. ISSN 1359-0294. Acessado em 29/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359029424001110>>.
- BADRAN, G.; LAZAROV, V. K. From waste to resource: Exploring the current challenges and future directions of photovoltaic solar cell recycling. *Solar*, v. 5, n. 1, 2025. ISSN 2673-9941. Acessado em 22/04/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-9941/5/1/4>>.
- BASHIR, S.; IQBAL, J.; FARHANA, K.; JAFER, R.; HINA, M.; KASI, R.; SUBRAMANIAM, R. T. Chapter 9 - hybrid organic polymer electrolytes for dye-sensitized solar cells. In: PANDEY, A. K.; SHAHABUDDIN, S.; AHMAD, M. S. (Ed.). *Dye-Sensitized Solar Cells*. Academic Press, 2022. p. 181–212. ISBN 978-0-12-818206-2. Acessado em 25/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182062000062>>.
- BENDENIA, C.; MERAD-DIB, H.; BENDENIA, S.; BESSAHA, G.; HADRI, B. Theoretical study of the impact of the d/a system polymer and anodic interfacial layer on inverted organic solar cells (bj) performance. *Optical Materials*, v. 121, p. 111588, 2021. ISSN 0925-3467. Acessado em 29/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346721007886>>.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998*. 2010. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Acessado em 18/05/2025. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.
- BRASIL. *Projeto de Lei nº 3.784, de 2023: Altera a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para obrigar os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de painéis solares fotovoltaicos a estruturar e implementar sistemas de logística reversa*. 2023. Senado Federal, Brasília, DF, 16 ago. 2023. Acessado em 18/05/2025. Disponível em: <<https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9426480&ts=1739992526651&disposition=inline>>.

BRASIL. *Projeto de Lei nº 998, de 2024: Institui a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos*. 2024. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, 26 mar. 2024. Acessado em 18/05/2025. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2423751>>.

CAMPOS, L. O. *Backsheet Painel Solar: Para que Serve?* 2023. Acessado em: 01/02/2025. Disponível em: <<https://boaenergia.com.br/glossario/backsheet-painel-solar-para-que-serve/>>.

CAO, F.; LIU, Y.; ZHANG, X.; ZHANG, X.; YU, Y.; HONG, E.; HAN, S. Lead-free single crystal metal halide perovskite detectors. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, v. 164, p. 100991, 2025. ISSN 0927-796X. Acessado em 26/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X25000683>>.

CELIK, I.; LUNARDI, M.; FREDERICKSON, A.; CORKISH, R. Sustainable end of life management of crystalline silicon and thin film solar photovoltaic waste: The impact of transportation. *Applied Sciences*, v. 10, n. 16, 2020. ISSN 2076-3417. Acessado em 03/07/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5465>>.

CHAVAN, G.; KIM, Y.; KHOKHAR, M.; HUSSAIN, S. Q.; CHO, E.; YI, J.; AHMAD, Z.; ROSAIAH, P.; JEON, C.-W. A brief review of transparent conducting oxides (tco): The influence of different deposition techniques on the efficiency of solar cells. *Nanomaterials*, v. 13, p. 1226, 03 2023. Acessado em 24/04/2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/369728731_A_Brief_Review_of_Transparent_Conducting_Oxides_TCO_The_Influence_of_Different_Deposition_Techniques_on_the_Efficiency_of_Solar_Cells>.

CHI, W.; BANERJEE, S. K. Comparison and integration of CuInGaSe and perovskite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*, v. 78, p. 463–475, 2023. ISSN 2095-4956. Acessado em 26/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495622006738>>.

CRSES. *First Solar's CdTe module technology – performance, life cycle, health and safety impact assessment*. 2015. Acessado em: 19/04/2025. Disponível em: <https://www.crses.sun.ac.za/files/research/publications/technical-reports/CRSES2015_06_First%20Solar%20CdTe%20Module%20Technology%20Review_RevA.pdf>.

DELFT, C. *Environmental Prices Handbook 2024: EU27 version*. 2025. Acessado em 03/05/2025. Disponível em: <https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2024/12/CE_Delft_230107_Environmental-Prices-Handbook-2024-EU-version_def_V1.1.pdf>.

EIA. *Electric Power Monthly*. 2025. Acessado em 03/05/2025. Disponível em: <https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_5_3>.

ENERGIA, M. de Minas e. *Maior usina de produção de energia solar do Brasil entra em operação no interior de Minas Gerais*. 2023. Acessado em 18/08/2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/maior-usina-de-producao-de-energia-solar-do-brasil-entra-em-operacao-no-interior-de-minas-gerais>>.

ENERGIA, O. *A história da energia solar no Brasil*. 2020. Acessado em: 18/01/2025. Disponível em: <<https://origoenergia.com.br/blog/energia/a-historia-da-energia-solar-no-brasil#:~:text=No%20entanto%2C%20a%20primeira%20usina,extremamente%20relevante%20para>>.

EPE, E. de P. E. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034*. 2024. Acessado em 18/05/2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>>.

EUROSTAT. *Electricity price statistics*. 2025. Acessado em 03/05/2025. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics>.

FEDERAL, G. *Lei nº 14.300/2022*. 2022. Acessado em: 18/01/2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/leis/lei-n-14-300-2022.pdf/view#:~:text=Lei_n_14.,300%2F2022,1996%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias.>>

FOTOVOLT. *Alíquota de importação de módulos solares vai para 252024*. Acessado em 24/05/2025. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/noticia/9952-Aliquota-de-importacao-de-modulos-solares-vai-para-25-.html>>.

FRAAS, L. Chapter 6: The dream of thin film pv. In: _____. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-3-319-07529-7. Acessado em 24/04/2025.

FTHENAKIS, V.; ATHIAS, C.; BLUMENTHAL, A.; KULUR, A.; MAGLIOZZO, J.; NG, D. Sustainability evaluation of cdte pv: An update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 123, p. 109776, 2020. ISSN 1364-0321. Acessado em 02/07/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300721>>.

GRANATA, G.; PAGNANELLI, F.; MOSCARDINI, E.; HAVLIK, T.; TORO, L. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 123, p. 239–248, 2014. ISSN 0927-0248. Acessado em 16/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481400018X>>.

GREENER. *Estudo Estratégico de Geração Distribuída 2023*. 2024. Acessado em 22/05/2025. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Estudo-GD-2024-V1.0-3.pdf>>.

HERMENAU, M.; RIEDE, M.; LEO, K.; GEVORGYAN, S. A.; KREBS, F. C.; NORRMAN, K. Water and oxygen induced degradation of small molecule organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 95, n. 5, p. 1268–1277, 2011. ISSN 0927-0248. Acessado em 27/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481100002X>>.

IRENA; IEA-PVPS. *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. 2016. Acessado em 18/05/2025. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>.

IRENA, A. D. I. R. E. A. *Renewable capacity statistics 2025*. 2025. Acessado em 17/05/2025. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf>.

KAHANA, L. *Silver-alloyed CIGS solar cell achieves 17.72024*. Acessado em 25/04/2025. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2024/01/08/silver-alloyed-cigs-solar-cell-achieves-17-7-efficiency/>>.

LATUNUSSA, C. E.; ARDENTE, F.; BLENGINI, G. A.; MANCINI, L. Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 156, p. 101–111, 2016. ISSN 0927-0248. Life cycle, environmental, ecology and impact analysis of solar technology. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816001227>>.

LIN, S.; HE, X.; XU, Q.; LI, Y.; FANG, D. Research progress on dyes for n-type dye-sensitized solar cells. *Materials Science and Engineering: B*, v. 314, p. 118052, 2025. ISSN 0921-5107. Acessado em 14/02/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510725000753>>.

MAALOUF, A.; OKOROAFOR, T.; JEHL, Z.; BABU, V.; RESALATI, S. A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 186, p. 113652, 2023. ISSN 1364-0321. Acessado em 03/07/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123005099>>.

MAJHI, J.; GHOSH, S.; PRIYA, K.; SHARMA, S.; BANDYOPADHYAY, A. A critical review on the progress of emerging active and substrate materials for organic solar cells and device level fabrication techniques by solution process method. *Next Materials*, v. 8, p. 100595, 2025. ISSN 2949-8228. Acessado em 27/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949822825001133>>.

MARKERT, E.; CELIK, I.; APUL, D. Private and externality costs and benefits of recycling crystalline silicon (c-si) photovoltaic panels. *Energies*, v. 13, n. 14, 2020. ISSN 1996-1073. Acessado em 09/03/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3650>>.

MIETTUNEN, K.; SANTASALO-AARNIO, A. Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery. *Journal of Cleaner Production*, v. 320, p. 128743, 2021. ISSN 0959-6526. Acessado em 01/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621029425>>.

NGAGOUM NDALLOKA, Z.; VIJAYAKUMAR NAIR, H.; ALPERT, S.; SCHMID, C. Solar photovoltaic recycling strategies. *Solar Energy*, v. 270, p. 112379, 2024. ISSN 0038-092X. Acessado em 09/02/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X24000732>>.

NREL, N. R. E. L. *NREL analysis of manufacturing costs for silicon solar cells includes bottom-up cost modeling for all the steps in the silicon value chain*. 2021. Acessado em 25/01/2025. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-cost-analysis.html>>.

NREL, N. R. E. L. *Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart*. 2025. Acessado em 21/08/2025. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency>>.

OH, H.; BAE, J.; HAN, J. Economic and environmental feasibility evaluation study of hydrometallurgical recycling methods for perovskite solar cells. *Journal of Cleaner Production*, v. 489, p. 144651, 2025. ISSN 0959-6526. Acessado em 15/02/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625000010>>.

- PADOAN, F. C. dos S. M.; SCHIAVI, P. G.; BELARDI, G.; ALTIMARI, P.; RUBINO, A.; PAGNANELLI, F. Material flux through an innovative recycling process treating different types of end-of-life photovoltaic panels: Demonstration at pilot scale. *Energies*, v. 14, n. 17, 2021. ISSN 1996-1073. Acessado em 09/05/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5534>>.
- PASTUSZAK, J.; WEGIEREK, P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, v. 15, n. 16, 2022. ISSN 1996-1944. Acessado em 21/08/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/15/16/5542>>.
- PESSOA, Y.; GALO, N. Avaliação de resíduos fotovoltaicos: Previsão de geração no brasil. In: . [s.n.], 2023. Acessado em 22/05/2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/375027425_Avaliacao_de_residuos_fotovoltaicos_Previsao_de_geracao_no_Brasil>.
- PHILIPPS, F. I. S.; WARMUTH, P. P. G. W. *Photovoltaics Report*. 2024. Acessado em 17/05/2025. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>>.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014. Acessado em: 02/02/2025. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>.
- PRADO, P. F. de A. *Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais*. 2018. Acessado em: 04/03/2025. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30012019-141410/publico/PedroForastierideAlmeidaPradoCorr18.pdf>>.
- PREET, S.; SMITH, S. T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, v. 448, p. 141661, 2024. ISSN 0959-6526. Acessado em 24/01/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624011090>>.
- RAHMAN, K. S. Subchapter 3.1 - cadmium telluride (cdte) thin film solar cells. In: AKHTARUZZAMAN, M.; SELVANATHAN, V. (Ed.). *Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*. Academic Press, 2022, (Solar Cell Engineering). p. 65–83. ISBN 978-0-323-85529-7. Acessado em 24/04/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323855297000098>>.
- RAVILLA, A.; GULLICKSON, E.; TOMES, A.; CELIK, I. Economic and environmental sustainability of copper indium gallium selenide (cigs) solar panels recycling. *Science of The Total Environment*, v. 951, p. 175670, 2024. ISSN 0048-9697. Acessado em 19/03/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724058261>>.
- SATPATHY, R.; PAMURU, V. Chapter 1 - manufacturing of polysilicon. In: SATPATHY, R.; PAMURU, V. (Ed.). *Solar PV Power*. Academic Press, 2021. p. 1–29. ISBN 978-0-12-817626-9. Acessado em 25/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176269000010>>.
- SATPATHY, R.; PAMURU, V. Chapter 2 - silicon crystal growth process. In: SATPATHY, R.; PAMURU, V. (Ed.). *Solar PV Power*. Academic Press, 2021. p. 31–52. ISBN 978-0-12-817626-9. Acessado em 25/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176269000022>>.

SATPATHY, R.; PAMURU, V. Chapter 5 - manufacturing of crystalline silicon solar pv modules. In: SATPATHY, R.; PAMURU, V. (Ed.). *Solar PV Power*. Academic Press, 2021. p. 135–241. ISBN 978-0-12-817626-9. Acessado em 17/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176269000058>>.

SEYISI, T.; FOU DA-MBANGA, B.; MNYANGO, J.; NTHWANE, Y.; NYONI, B.; MHLANGA, S.; HLANGOTHI, S.; TYWABI-NGEVA, Z. Major challenges for commercialization of perovskite solar cells: A critical review. *Energy Reports*, v. 13, p. 1400–1415, 2025. ISSN 2352-4847. Acessado em 10/02/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725000198>>.

SINHA, P.; COSSETTE, M.; MENARD, J.-F. End-of-life cdte pv recycling with semiconductor refining. 01 2012. Acessado em 02/05/2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308950914_End-of-Life_CdTe_PV_Recycling_with_Semiconductor_Refining>.

SOLAR, A. *Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels*. 2021. Acessado em: 02/02/2025. Disponível em: <<https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>>.

SOLAR, F. *525-550 Watt Thin Film Solar Module*. 2024. Acessado em 02/05/2025. Disponível em: <<https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-7/Series-7-TR1-High-Bin-Datasheet.pdf>>.

SOLAR, P. *Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar*. 2020. Acessado em: 01/02/2025. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>.

SUN, R.; YUAN, X.; YANG, X.; WU, Y.; SHAO, Y.; WU, X.; BRABEC, C. J.; MIN, J. Cost-efficient recycling of organic photovoltaic devices. *Joule*, v. 8, n. 9, p. 2523–2538, 2024. ISSN 2542-4351. Acessado em 29/04/2025. Disponível em: <[https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351\(24\)00254-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS254243512400254X%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351(24)00254-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS254243512400254X%3Fshowall%3Dtrue)>.

SØNDERGAARD, R.; ZIMMERMANN, Y.-S.; ESPINOSA, N.; LENZ, M.; KREBS, F. Incineration of organic solar cells: Efficient end of life management by quantitative silver recovery. *Energy Environ. Sci.*, v. 9, 03 2016. Acessado em 29/04/2025.

TEKNETZI, I.; HOLGERSSON, S.; EBIN, B. Valuable metal recycling from thin film cigs solar cells by leaching under mild conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 252, p. 112178, 2023. ISSN 0927-0248. Acessado 08/02/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822005955>>.

TRIVEDI, H. K.; MESHARAM, A.; GUPTA, R. Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 109501, 2023. ISSN 2213-3437. Acessado em 01/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723002403>>.

TUTORIALS, A. E. *Parallel Connected Solar Panels*. 2020. Acessado em: 01/02/2025. Disponível em: <<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/parallel-connected-solar-panels.html>>.

VICKERMAN, J. *What the future holds for the longevity and efficiency of solar panels*. 2025. Acessado em 21/08/2025. Disponível em: <<https://ratedpower.com/blog/longevity-efficiency-solar-panels/>>.

WANG, J.; FENG, Y.; HE, Y. Advancements in recycling technologies for waste cigs photovoltaic modules. *Nano Energy*, v. 128, p. 109847, 2024. ISSN 2211-2855. Acessado em 03/07/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285524005950>>.

WANG, Z.; LI, B.; SONG, X.; ZHUANG, X.; WU, W.; LI, A. Generation and resource potential of waste pv modules considering technological iteration: A case study in china. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 112, p. 107790, 2025. ISSN 0195-9255. Acessado em 22/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925524003779>>.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, v. 75, p. 450–458, 2018. ISSN 0956-053X. Acessado em 03/07/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300576>>.

YU, H. F.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; AMIN, N.; ADZMAN, N. N. Global challenges and prospects of photovoltaic materials disposal and recycling: A comprehensive review. *Sustainability*, v. 14, n. 14, 2022. ISSN 2071-1050. Acessado em 11/05/2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8567>>.

YUAN, X.; XU, Z. Life cycle assessment of decommissioned silicon photovoltaic module recycling using different technological configurations in china. *Journal of Environmental Management*, v. 370, p. 122476, 2024. ISSN 0301-4797. Acessado em 31/05/2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724024629>>.

ZHOU, Y.; FUENTES-HERNANDEZ, C.; KHAN, T.; LIU, J.-C.; HSU, J.; SHIM, J.; DINDAR, A.; YOUNGBLOOD, J.; MOON, R.; KIPPELEN, B. Recyclable organic solar cells on cellulose nanocrystal substrates. *Scientific reports*, v. 3, p. 1536, 03 2013. Acessado em 29/04/2025.