

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANTÔNIO LÚCIO DE OLIVEIRA SOUZA NETO

**RESÍDUOS ORIUNDOS DO DESCARTE DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS: PROPOSTAS ATUAIS PARA
TRATAMENTO E DESAFIOS PARA O BRASIL**

SÃO CARLOS – SP
2023

ANTÔNIO LÚCIO DE OLIVEIRA SOUZA NETO

**RESÍDUOS ORIUNDOS DO DESCARTE DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: PROPOSTAS
ATUAIS PARA TRATAMENTO E DESAFIOS PARA O BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira.

São Carlos – SP
2023

Souza Neto, Antônio Lúcio de Oliveira

Resíduos oriundos do descarte de painéis fotovoltaicos:
propostas atuais para tratamento e desafios para o Brasil
/ Antônio Lúcio de Oliveira Souza Neto -- 2023.
48f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Maria do Carmo Ferreira

Banca Examinadora: Maria do Carmo Ferreira,
Reginaldo Leandro Cuchaba, Rosineide Gomes da Silva
Cruz

Bibliografia

1. Painéis fotovoltaicos. 2. Resíduos eletrônicos. 3.
Reciclagem. I. Souza Neto, Antônio Lúcio de Oliveira. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Antônio Lúcio de Oliveira Souza Neto, realizada em 14/03/2023:

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira
Universidade Federal de São Carlos

Reginaldo Leandro Cuchaba
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Rosineide Gomes da Silva Cruz
Universidade Federal de São Carlos

Dedico este trabalho a todos que se preocupam com a sustentabilidade e com a qualidade de vida no planeta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Eliza por todo modelo, apoio e incentivos que sempre me forneceu para estudar e alcançar meus objetivos com autonomia. À minha namorada Letícia, por me inspirar determinação e por prontamente me ajudar com dicas e materiais sobre pesquisa e trabalhos acadêmicos, tornando mais tranquilo o processo de elaboração e conclusão deste trabalho. Ao meu padrasto Ricardo, pelo apoio durante os vestibulares.

Agradeço à Maria, minha orientadora, que foi muito solícita com relação às minhas dúvidas o tempo todo, além de oferecer sugestões que sempre aumentaram a qualidade e a clareza do meu texto.

Também agradeço aos meus amigos da graduação, Guilherme, Leonardo Q., Leonardo S., Regis, Jorge, João, Pablo, Pedro e Alex pela parceria que contribuiu para que minha trajetória acadêmica também tenha sido repleta de momentos de colaboração e descontração.

Por fim, agradeço à UFSCar e a todo o corpo docente, sem os quais eu não teria a sólida formação profissional de hoje.

Se você pensa que pode, ou que não pode, você está certo.

(Henry Ford)

RESUMO

Em um contexto em que a degradação do meio ambiente é potencializada pelo uso de combustíveis fósseis, a radiação solar se destaca como uma fonte de energia limpa e renovável. Para tanto, são utilizados os painéis ou módulos fotovoltaicos, que captam a radiação solar e convertem-na em energia elétrica. No Brasil, a taxa média de crescimento da geração distribuída fotovoltaica tem sido superior a 200% desde 2013. Contudo, os painéis fotovoltaicos têm cerca de 25 anos de vida útil, período a partir do qual a troca é recomendada, gerando preocupação quanto ao protocolo de descarte. Componentes dos painéis, como chumbo e cádmio, por exemplo, oferecem risco ao meio ambiente e à saúde humana quando lixiviados, tornando urgente a discussão de estratégias para limitar os riscos oferecidos. Todavia, a existência de estratégias não implica na sua pronta implementação, pois as realidades dos locais em que poderão ser postas em prática também precisam ser consideradas. Sendo assim, este trabalho efetuou uma revisão da literatura técnico-científica sobre estratégias para reduzir a geração de resíduos produzidos no descarte de painéis fotovoltaicos, analisando dados disponíveis no Brasil e no exterior. Os objetivos foram: contextualizar o potencial de contaminação e seus efeitos no meio ambiente; apresentar e discutir as soluções que têm sido propostas para evitar esse acúmulo; e discutir os desafios técnicos e operacionais para a sua implementação no Brasil. No levantamento, foram utilizadas as bases de dados Scielo, Periódicos CAPES, banco de teses da CAPES, Google Scholar e sites comerciais. Foram utilizadas como termos de busca as seguintes palavras-chave: energia solar; módulo fotovoltaico; resíduo eletrônico; EVA; fotovoltaic; fotovoltaic technology; solar panels; recycling; waste generation. Como resultado, espera-se contribuir para: ampliar a conscientização de usuários e do público em geral acerca dos riscos associados ao aumento do uso de painéis fotovoltaicos; compilar, em documento único e de amplo acesso, informações sobre quais são as tecnologias existentes para o gerenciamento dos resíduos gerados pelo descarte dos painéis; registrar uma análise técnica sobre as tecnologias propostas. Desse modo, o presente estudo poderá ser utilizado como fonte de consulta para usuários de painéis fotovoltaicos, técnicos, engenheiros e a todos os interessados em conhecer mais a respeito do assunto.

Palavras-chave: Painéis fotovoltaicos. Resíduos eletrônicos. Reciclagem.

ABSTRACT

In light of the growing environmental degradation caused by the use of fossil fuels, solar energy arises as a clean and renewable source of power. This is achieved through the use of photovoltaic panels, which capture solar radiation and convert it into electrical energy. In Brazil, the growth rate of photovoltaic distributed generation has been remarkable, surpassing 200% since 2013. Although photovoltaic panels have a lifespan of about 25 years, the need for replacement raises concerns about the proper disposal protocol for these panels. The presence of hazardous materials, such as lead and cadmium, poses a risk to both the environment and human health if not properly managed. Hence, it is imperative to explore strategies that mitigate these risks. This study reviews the technical-scientific literature on strategies to reduce the waste generated in the disposal of photovoltaic panels, analyzing available data in Brazil and globally. The objectives of this study are to provide context on the contamination potential and its effects on the environment; present and discuss solutions aimed at avoiding waste accumulation; discuss the technical and operational challenges in implementing these solutions in Brazil. The study was based on various sources such as the Scielo database, CAPES periodicals, the CAPES thesis bank, Google Scholar, and commercial websites. The following keywords were used in the search: solar energy, photovoltaic module, electronic waste, EVE, photovoltaic technology, solar panels, recycling, and waste generation. We hope to contribute to raising awareness among users and the general public about the risks associated with increased use of photovoltaic panels; compiling information on existing technologies for managing waste generated from photovoltaic panel disposal in a single and easily accessible document; providing a technical analysis of the proposed technologies. In conclusion, this study serves as a reference source for users of photovoltaic panels, technicians, engineers, and anyone interested in knowing more about the subject.

Keywords: Photovoltaic panels. Electronic waste. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração dos componentes do painel de silício cristalino (c-Si)	18
Figura 2 – Configuração dos módulos de filme fino (CdTe e CIGS de junção única)	19
Figura 3 – Ilustrações de células fotovoltaicas de silício monocristalino, silício policristalino e filme fino	19
Figura 4 – Expansão Indicativa de Referência de diferentes fontes de energia, incluindo a solar	24
Figura 5 – Diagramas do processo de reciclagem dos painéis de silício cristalino (c-Si) e de telureto de cádmio (CdTe)	26
Figura 6 – Fluxograma simplificado dos tratamentos físico e químico dos painéis fotovoltaicos em final de vida.....	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tecnologias de reciclagem de painéis de silício	29
Quadro 2 – Tecnologias de reciclagem de painéis de filme fino.....	30
Quadro 3 – Métodos de reciclagem de módulos fotovoltaicos do tipo c-Si encontrados na literatura.....	31
Quadro 4 – Estudos empíricos realizados no Brasil acerca da reciclagem de painéis fotovoltaicos, apresentando seus objetivos e processos empregados, bem como considerações acerca das vantagens e desvantagens	32
Quadro 5 – Desafios, recomendações e ações em relação ao uso da energia solar apontados no Painel PNE 2050, considerando os decênios de 2020 a 2030 e de 2030 a 2040.....	39
Quadro 6 – Possibilidades de destino dos componentes de painéis fotovoltaicos após o final do processo de reciclagem	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de painéis fotovoltaicos, considerando classificação, materiais, potência e valor médio.....	20
Tabela 2 – Massa percentual aproximada de alumínio, cobre, estanho, zinco, chumbo e cádmio em painéis de primeira e segunda geração	22
Tabela 3 – Estimativa do volume, em toneladas, de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil até 2050.....	24

LISTA DE SIGLAS

a-Si - silício amorfo

BFR - retardador de chama bromado

CdTe - telureto de cádmio

CIGS - disseleneto de cobre-índio-gálio

CO_{2eq} - dióxido de Carbono Equivalente

CPV - concentrator photovoltaics

c-Si - silício cristalino

DSSC - Dry-sensitised solar cell

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EVA - etileno acetato de vinila

FV - fotovoltaico

IEA - International Energy Agency

IRENA - International Renewable Energy Agency

MME - Ministério de Minas e Energia

NREL - National Renewable Energy Laboratory

PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia

PNE - Plano Nacional de Energia

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

REEE - Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos

SIN - Sistema Interligado Nacional

TCO - tampão óxido condutor transparente

UE - União Europeia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS GERAIS	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL SOBRE OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	16
2.1	TIPOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	17
2.2	SOBRE OS RISCOS À SAÚDE E AO MEIO AMBIENTE	21
2.3	ESTIMATIVAS DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS	23
3	MÉTODO	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM PROPOSTAS PARA O GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS PELO DESCARTE DOS PAINÉIS	26
4.2	DESAFIOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS PROPOSTAS NO BRASIL	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A degradação do meio ambiente, potencializada pelo uso de combustíveis fósseis, torna urgente o aproveitamento de fontes de energias limpas e renováveis. Entre essas fontes, destaca-se a luz solar (BETTANIN, 2017), que é convertida em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico em painéis ou módulos fotovoltaicos fabricados com materiais semicondutores, sendo o silício o mais utilizado.

Os painéis fotovoltaicos (FV) são classificados como primeira, segunda ou terceira geração, cada uma com características específicas (DIAS, 2015; WU *et al.*, 2005). De forma geral, os principais componentes incluem polímeros, prata, índio, cádmio, telúrio, cobre, chumbo, alumínio e vidro. Quanto à vida útil dos painéis FV, o período é de 25 a 30 anos, após o qual a substituição do painel é recomendada, pois a geração de energia é reduzida para cerca de 80% (VALADARES, 2019).

Quando descartados, os painéis FV são enquadrados como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), assim como celulares e afins, com potencial de impactar negativamente o ambiente e a saúde humana, devido à liberação de substâncias tóxicas (MONIER; HESTIN, 2011). Além disso, há desperdício de matérias-primas valiosas, como a prata e o cobre, e convencionais, como alumínio e vidro (CAMARGO, 2021).

Na Europa, que possui a maior capacidade instalada de painéis FV, o descarte é uma preocupação, de modo que a comissão da União Europeia (UE) incluiu os painéis na diretiva relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (DIRECTIVE 2012/19/EU). No Brasil, a capacidade instalada ainda está aumentando, assim como a geração distribuída de energia fotovoltaica, cuja taxa média de crescimento foi 230% desde 2013, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2020). Porém, considerando o momento em que várias substituições precisarem ser realizadas, questiona-se: como será gerenciado o grande volume de lixo que será gerado no futuro, quando os painéis atualmente em operação precisarem ser descartados?

A literatura aponta que a reciclagem dos painéis em fim de vida útil é a principal estratégia de gerenciamento dos resíduos (GHIZONI, 2016), evitando acúmulo de lixo e riscos de contaminação do ambiente, além de permitir a recuperação de componentes valiosos, reduzindo os custos de fabricação de novos painéis (CAMARGO, 2021; HUANG *et al.*, 2017).

Contudo, os métodos de reciclagem propostos na literatura não são amplamente descritos em estudos de revisão nacionais, havendo uma predominância de pesquisas que enfatizaram métodos aplicados a painéis FV de primeira geração (por exemplo, COELHO; SERRA, 2018; MIRANDA, 2019; OLIVEIRA, 2021). Paralelamente, no exterior, a revisão de Chowdhury *et al.* (2020) tratou sobre o tema, incluindo métodos para painéis de segunda geração, porém não considerou estudos desenvolvidos no Brasil. A conjugação dessas lacunas denota a importância de compilar informações sobre o tema em um documento único e acessível.

Logo, neste trabalho, será efetuada uma revisão da literatura técnico-científica sobre estratégias de reciclagem de painéis FV para reduzir a geração de resíduos produzidos no descarte, analisando dados disponíveis no Brasil e no exterior.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Os objetivos deste trabalho são apresentar e discutir os métodos de reciclagem de painéis FV propostos em estudos internacionais e nacionais, ponderando potencialidades e desafios da implementação em escala industrial no Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar estatísticas sobre a geração de energia FV no Brasil e os tipos de painéis FV;
- Contextualizar os riscos e possíveis efeitos prejudiciais que painéis fotovoltaicos em fim de vida útil com descarte incorreto podem oferecer à saúde pública e ao meio ambiente;
- Apresentar estimativas sobre qual será a geração de resíduos por painel FV desativado no Brasil dentro de alguns anos;
- Apresentar métodos e técnicas de reciclagem que têm sido empregados no tratamento de painéis FV, considerando tanto os procedimentos de uso comercial quanto os estudados em laboratório;
- Destacar e descrever estudos brasileiros que sugeriram procedimentos de reciclagem de painéis FV, considerando que na literatura existe uma predominância de citações de estudos internacionais;
- Discutir desafios técnicos e operacionais para a implementação da reciclagem em escala industrial no Brasil, considerando e apresentando ações

governamentais que têm sido propostas no que tange à destinação adequada de resíduos eletrônicos;

- Propor reflexões e sugestões que possam auxiliar na elaboração de estratégias que fomentem a destinação correta dos painéis FV no Brasil, bem como a implementação, no futuro, da reciclagem desses painéis em escala industrial.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, o tema é introduzido, destacando a relevância da discussão sobre as soluções propostas para evitar o acúmulo de resíduos gerados pelo descarte de painéis fotovoltaicos no final da vida útil.

No Capítulo 2, é apresentada uma contextualização geral sobre os painéis fotovoltaicos, destacando algumas estatísticas sobre geração de energia fotovoltaica no Brasil; tipos de painéis fotovoltaicos existentes, para facilitar a compreensão das especificidades de cada um, como componentes, eficiência e preços; os riscos à saúde e ao meio ambiente, considerando os componentes de tipos específicos de painel; estimativas sobre a geração de resíduos.

No Capítulo 3, é descrito o método de levantamento dos estudos que trataram de estratégias para reduzir a geração de resíduos pelo descarte dos painéis.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões. Além, das tecnologias propostas para o gerenciamento dos resíduos, são apresentados e discutidos os desafios técnicos e operacionais para a implementação das propostas no Brasil.

No Capítulo 5, constam as considerações finais do trabalho.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL SOBRE OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

No que tange às estatísticas da geração de energia FV no Brasil, a ABSOLAR elabora, mensalmente, um infográfico sobre o panorama no país, após analisar dados do setor. A versão mais recente, publicada em 7 de fevereiro de 2023, informou que a fonte solar FV produz 11,6% dos 206.838 MW da matriz elétrica brasileira. Embora a fonte hídrica ainda produza a maior porcentagem de eletricidade (50,7%), a solar corresponde à segunda maior e atingiu recordes de geração de energia elétrica no

Sistema Interligado Nacional (SIN): em outubro de 2022, gerou 2,6% da oferta de energia elétrica; em 28 de dezembro de 2022, a média diária de geração foi de 2196 MW, valor que atende a 3,3% da demanda por eletricidade do país.

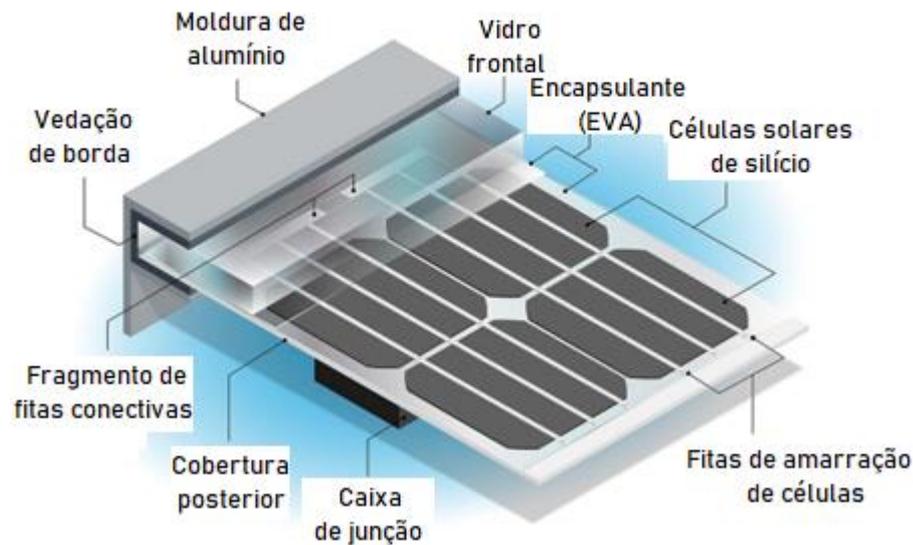
Quanto à geração distribuída solar FV, a ABSOLAR (2023) indicou a existência de 17.241,9 MW de potência instalada no país, por classe de consumo: residencial (49,2%); comercial e serviços (28,3%); rural (14,6%); industrial (6,3%); poder público (1,0%); serviço público (0,1%); iluminação pública (0,03%). No ranking estadual, Minas Gerais lidera com 13,9% da potência instalada, seguido de São Paulo (13,5%), Rio Grande do Sul (11,2%), Paraná (9,6%) e Mato Grosso (5,8%). Com 0,1%, Roraima ficou na vigésima sétima colocação. No ranking municipal, os dez primeiros colocados foram: Florianópolis, SC (1,8%); Brasília, DF (1,2%); Cuiabá, MT (0,9%); Teresina, PI (0,9%); Campo Grande, MS (0,9%); Fortaleza, CE (0,8%); Goiânia, GO (0,7%); Rio de Janeiro, RJ (0,7%); Uberlândia, MG (0,6%); Manaus, AM (0,5%).

2.1 TIPOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis são divididos em três grupos (1^a, 2^a e 3^a geração). O critério de classificação depende do material com que os painéis são fabricados e de suas características (DIAS, 2015; WU *et al.*, 2005). A primeira geração é composta pelo silício cristalino (c-Si), cuja estrutura pode ser monocristalina ou policristalina (Ver Figura 1 para detalhes sobre a configuração).

O painel monocristalino é mais eficiente e também mais caro, pois é produzido a partir de um único cristal de silício ultra-puro, que é fatiado em lâminas de silício individuais, por sua vez tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. O painel policristalino tem menor custo e é relativamente mais fácil de produzir. Mas é um pouco menos eficiente, por ser fundido em um bloco e solidificado. Quando o bloco é fatiado em células, observa-se a formação de vários cristais. Em termos numéricos, para uma comparação mais exata, a eficiência média do painel de silício monocristalino é de 15 a 22%, enquanto a de silício policristalino é de 14 a 20% (PORTAL SOLAR, S. I.). Como a diferença é de apenas 1 a 2%, é possível que a complexidade da produção de cada tipo de painel justifique a diferença de preço.

Figura 1 – Configuração dos componentes do painel de silício cristalino (c-Si)



Fonte: adaptado de National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2016).

Observando a Figura 1, vale complementar que o vidro que envolve a camada superior do painel possibilita que passe o máximo de luz através dele, com menor reflexão. O etileno acetato de vinila (EVA), por sua vez, protege o painel de temperaturas extremas e umidade, além de garantir o máximo de incidência solar (EBBING, 2014). Já os diferentes contatos metálicos permitem a geração da corrente elétrica, enquanto a moldura de alumínio estrutura o painel, garantindo leveza e resistência (BROUWER; GUPTA; HONDA, 2011).

A segunda geração é formada pelos módulos de filme fino (*thinfilm*), produzidos com materiais distintos, como telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si). Eles contêm uma ou mais camadas de materiais fotovoltaicos acima de um substrato, que pode ser vidro, ácido inoxidável ou plástico (Ver Figura 2 para detalhes sobre a configuração dos componentes). Esses módulos são menos eficientes que as células de silício monocristalino, com cerca de 6 a 9% de índice de eficiência no caso do silício amorfo, por exemplo (PORTAL SOLAR, S. I). Entretanto, são mais baratos e podem ser fabricados em larga escala, devido ao processo de fabricação mais simples, consumindo menos energia e matéria prima (VILLALVA, 2012).

Figura 2 – Configuração dos módulos de filme fino (CdTe e CIGS de junção única)

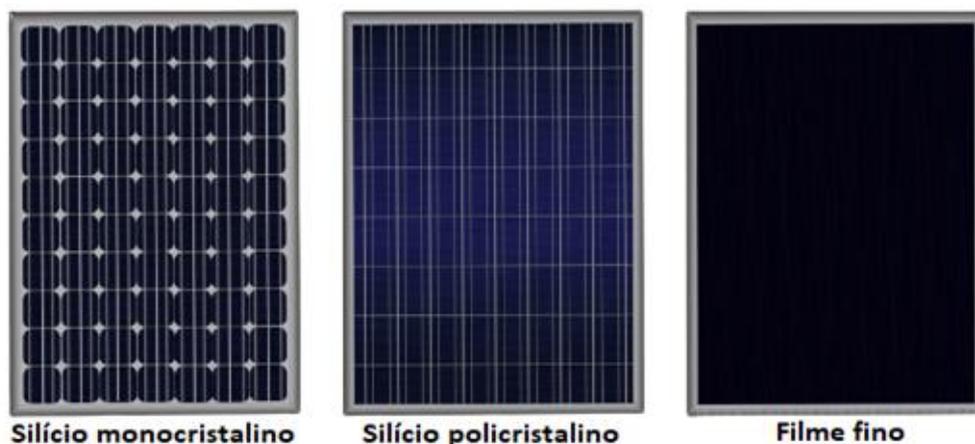


Fonte: adaptado de National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2016).

Nota: Tampão Óxido Condutor Transparente (TCO).

Na Figura 3, é possível comparar os painéis de primeira e segunda geração.

Figura 3 – Ilustrações de células fotovoltaicas de silício monocristalino, silício policristalino e filme fino



Fonte: MESTRE DA ENERGIA SOLAR (2021).

A terceira geração pertence às tecnologias emergentes e contém os módulos de CPV (*concentrator photovoltaics*), utilizados em lentes, e os DSSC (*Dry-sensitised solar cell*), que derivam de materiais orgânicos, como as células orgânicas e as híbridas. São altamente eficientes pela maior utilização da luz solar (eficiência variável nas orgânicas e de 21 a 24% nas híbridas) e utilizam materiais de baixa toxicidade (MONIER; HESTIN, 2011; PORTAL SOLAR, S. I.).

Em suma, os materiais que compõem cada tipo de painel mudam. Com relação à eficiência, não é diferente. Isso significa que, a depender do material utilizado, a porcentagem de energia solar que incidirá sobre a superfície do painel e será convertida em energia elétrica variará. Por conseguinte, quanto maior for a eficiência, menor deverá ser o painel para produzir uma mesma quantidade de energia (PORTAL SOLAR, S. I).

Outro fator que varia entre os painéis é o preço, sendo alguns mais viáveis economicamente que outros, conforme ilustra a Tabela 1. Como comentou Steiner (2020), a melhor opção dependerá do projeto em que serão aplicados. Ainda assim, a Tabela 1 também apresenta uma estimativa do custo-benefício de cada painel, por meio da divisão da potência fornecida em watts (W) pelo custo médio em reais (R\$), de modo que quanto maior é o resultado, melhor é o custo-benefício.

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de painéis fotovoltaicos, considerando classificação, materiais, potência, custo médio e razão W/R\$

Classificação	Material	Potência (W)	Custo Médio (R\$)	W/R\$
Primeira geração	Silício monocristalino	275	475,00	0,58
	Silício policristalino	360	860,00	0,42
Segunda geração	Filme fino	100	889,00	0,11
	Silício amorfo	3	63,00	0,04
	Telureto de cádmio	85	470,00	0,18
	Seleneto de cobre, índio e gálio	1,25	133,90	0,01
Terceira geração	Célula Orgânica	3	46,00	0,07
	Célula híbrida	405	715,00	0,57

Fonte: adaptado de PORTAL SOLAR, S. I.

Cabe ressaltar que, embora a melhor opção possa variar de acordo com o projeto, a análise da razão W/R\$ na Tabela 1 sugere que o uso de painéis de segunda geração pode não ser justificado. Mesmo considerando a redução do custo e a possibilidade de fabricação em larga escala dos modelos de segunda geração, os painéis de primeira geração ainda assim parecem apresentar uma vantagem significativa, devido ao seu maior custo-benefício.

2.2 SOBRE OS RISCOS À SAÚDE E AO MEIO AMBIENTE

Os riscos oferecidos pelo uso da energia fotovoltaica não são tão difundidos quanto seus benefícios na comparação com os combustíveis fósseis. O estudo de Steiner (2020) apresenta um indício desse fato ao encontrar que, na região de Tubarão, Santa Catarina, empresas que trabalham com placas fotovoltaicas possuíam pouco conhecimento relacionado à disposição final das placas. Apesar dessa baixa difusão, é inegável que o problema existe e urge ser discutido, considerando a popularização das placas fotovoltaicas.

Os riscos ao meio ambiente e à saúde oferecidos pelos painéis fotovoltaicos se devem, sobretudo, à lixiviação de chumbo e cádmio. No meio ambiente, ambos apresentam toxicidade e se acumulam na cadeia trófica. Na saúde, o chumbo atinge a corrente sanguínea e provoca efeitos negativos no sistema nervoso, reprodutor e cardiovascular; o cádmio, por sua vez, é um agente cancerígeno e mutagênico, podendo causar alterações fisiopatológicas em casos de exposição a ele (MONIER; HESTIN, 2011).

A lixiviação do chumbo é um risco associado aos painéis da primeira geração (de silício cristalino). A do cádmio, um risco associado aos painéis da segunda geração (de filmes finos). Como base de referência, cabe destacar que em um painel de primeira geração há 12,67 g de chumbo, sendo que entre 1,64 g e 11,4 g podem ser lixiviadas no ambiente. No painel de segunda geração, aproximadamente 4,6 g de cádmio está presente e entre 0,32 g e 1,84g do metal pode ser lixiviado no ambiente (MONIER; HESTIN, 2011).

No Japão, houve um famoso caso epidemiológico de exposição ao cádmio, quando, em meados do século XX, o arroz consumido pela comunidade foi contaminado por cádmio, ocasionando a doença itai-itai, cujos efeitos foram graves danos ósseos, como descalcificações e reumatismos (MULVANEY, 2019). Em decorrência de tantos possíveis prejuízos, o cádmio deixou de ser usado em uma variedade de produtos, como nas tintas. Ainda assim, a demanda pelo composto tem aumentado para o uso em filmes finos fotovoltaicos (ANSELMO, 2019).

Além do chumbo e do cádmio, um dado do estudo da *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2016) indicou a porcentagem de outros materiais, em relação à massa total dos painéis de primeira e segunda geração. Para isso, destacou, em gráfico, como deverá ser a evolução, de 2014 a 2030, da porcentagem de diferentes

materiais utilizados, como telúrio, zinco, estanho, prata, cobre, alumínio, silício, polímero e vidro. Steiner (2020) adaptou esses dados e apresentou, em tabela, os percentuais aproximados de massa de cada um desses componentes nos painéis de silício mono ou policristalino e nos de filme fino de telureto de cádmio. A Tabela 2 sintetiza algumas dessas informações.

Tabela 2 – Massa percentual aproximada de alumínio, cobre, estanho, zinco, chumbo e cádmio em painéis de primeira e segunda geração

Material	Painéis de primeira geração (silício mono/policristalino)	Painéis de segunda geração (telureto de cádmio)
	%	%
Alumínio	10,30	0,35
Cobre	0,57	1,00
Estanho	0,12	-
Zinco	0,12	0,01
Chumbo	0,06	-
Cádmio	-	0,07

Fonte: adaptada de STEINER (2020).

É oportuno salientar que os metais influenciam todas as formas de vida, a depender da quantidade e da forma química. Alguns, como o zinco e o cobre, são essenciais para o crescimento de organismos, porém podem provocar danos em altas concentrações (NAKANO; AVILA-CAMPOS, S. I.). De fato, o cobre pode, por exemplo, ocasionar irritação do sistema nervoso central e das mucosas, além de problemas hepáticos e renais (CASTRO, 2006). O zinco, por sua vez, pode provocar sintomas gastrointestinais, irritações na pele e desordens respiratórias, além de atravessar a barreira placentária e poder afetar o feto. No meio ambiente, o zinco pode ser uma ameaça para animais e plantas, devido ao processo de bioacumulação, em que a concentração de uma substância aumenta nos tecidos ou órgãos dos organismos (CASTRO, 2006). Nakano e Avila-Campos (S. I.) classificam-no, também, como um metal microcontaminante ambiental, assim como o alumínio e o estanho.

Não menos importante, frações não metálicas dos painéis FV também podem constituir uma ameaça ambiental. De acordo com Wang e Xu (2014), também citado por Coelho e Serra (2018), além de materiais pesados, elas podem conter, mesmo

após o tratamento, retardadores de chama bromados (BFR), assim como outras substâncias tóxicas.

As considerações acima fundamentam e fortalecem a importância de se prever um destino adequado dos painéis fotovoltaicos ao final do ciclo de vida. Reforçam, também, a importância da reciclagem para que componentes possam ser reaproveitados na fabricação de novos painéis. De acordo com Sica *et al.* (2017), existe um alto índice de recuperação de alguns materiais que compõem os painéis, como vidro (97%), alumínio (100%), cobre e telúrio (cerca de 80%), índio (75%) e gálio (99%). Reaproveitá-los em novos painéis também é uma forma de reduzir impactos ambientais, pois a produção de novos painéis gera emissão de gases como CO₂, SO₂ e NO_x (SOARES, 2017). Ou seja, com o reaproveitamento, a necessidade de processamento de matérias-primas será reduzida.

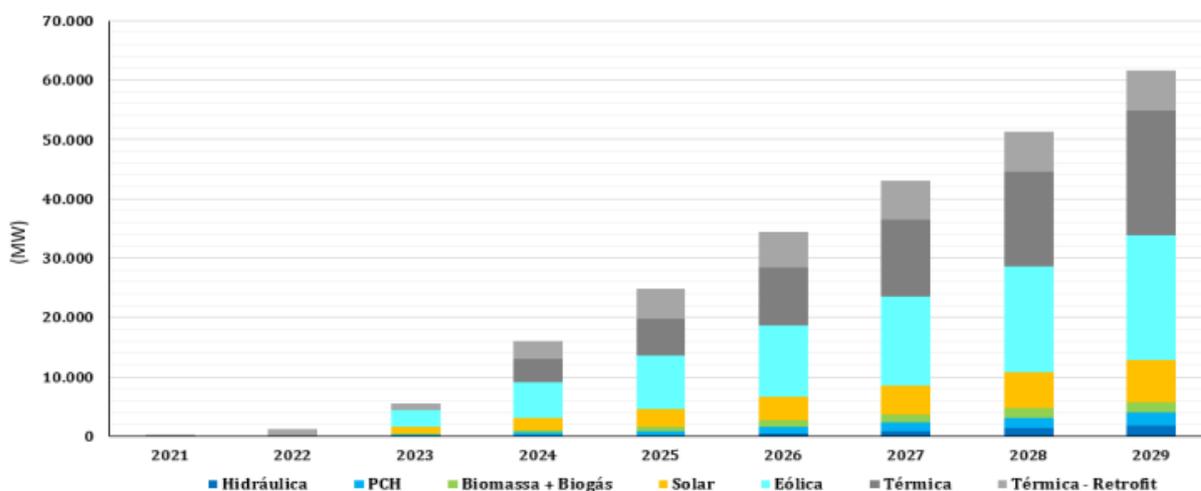
Concomitantemente, com a reciclagem dos painéis FV é possível diminuir, em até 2400 toneladas de CO₂/módulo, as emissões do efeito estufa, bem como reduzir o consumo de água, energia e materiais (D'ADAMO *et al.*, 2017). Somado a isso, Latunussa *et al.* (2016) encontrou que a reciclagem de 1 tonelada de painéis de silício cristalino gera a emissão de 370 Kg de CO_{2eq}. Ainda assim, vale considerar que produzir 1 tonelada de painéis a partir de materiais 100% primários acarreta a emissão de 800 a 1200 Kg de CO_{2eq} a mais do que produzir a mesma quantidade de painéis com unidades recicladas (PV Cycle, 2012). Ou seja, de qualquer maneira, a reciclagem de painéis FV em fim de vida útil se mostra vantajosa, de forma que inúmeros estudos têm se dedicado aos métodos de reciclagem dos painéis FV (BERGER *et al.*, 2010; DOI *et al.*, 2001; FTHENAKIS; WANG, 2006; GRANATA *et al.*, 2014; KIM; LEE, 2012; KLUGMANN-RADIEMSKA; OSTROWSKI, 2010; LATUNUSSA *et al.*, 2016; MARWEDE *et al.*, 2013; SHIN *et al.* 2017; TAO; SU, 2015).

2.3 ESTIMATIVAS DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Fthenakis (2018) estima que, no futuro próximo, o fim da vida útil dos painéis FV gerará cerca de 100 toneladas de resíduos/Watts de painéis FV desativados. No Brasil, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2020), o crescimento da energia fotovoltaica até 2029 será cerca de 12.000 MW (Figura 4). A elaboração do PDE 2029 foi iniciada em março de 2019 e concluída em setembro do mesmo ano.

Baseando-se nesses dados, Anselmo (2019) calculou que poderão ser produzidas pela fonte fotovoltaica, aproximadamente, 184 mil toneladas de resíduos no país.

Figura 4 – Expansão Indicativa de Referência de diferentes fontes de energia, incluindo a solar



Fonte: BRASIL (2020).

O IRENA (2016), por sua vez, realizou uma projeção dos volumes de resíduos de painéis FV por países. Para tanto, utilizou como referência a capacidade fotovoltaica instalada cumulativa histórica em cada país. A Tabela 3 apresenta um resumo desses dados, apresentando as estimativas do IRENA (2016) para o Brasil de 2030 a 2050. Um adendo é que tendo sido a projeção realizada em 2016, é possível que, atualmente, esses números sejam ainda maiores, uma vez que a capacidade instalada do país tem aumentado.

Tabela 3 – Estimativa do volume, em toneladas, de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil até 2050

Cenário	2030		2040		2050	
	Perda regular	Perda precoce	Perda regular	Perda precoce	Perda regular	Perda precoce
Brasil	2.500	8.500	18.000	160.000	300.000	750.000
Mundo	1.700.000	8.000.000	15.000.000	32.000.000	60.000.000	78.000.000

Fonte: adaptado de IRENA (2016).

Nota: perda regular considera uma vida útil de 30 anos. Perda precoce considera falhas nos painéis ou desgastes ocorridos antes do período de 30 anos.

Essas estimativas facilitam compreender que a disposição dos resíduos virá a ser um problema com o acúmulo de painéis descartados decorrente do rápido crescimento da energia solar. Nesta direção, é pertinente a discussão sobre tecnologias propostas para o gerenciamento dos resíduos oriundos dos descartes.

Hoje, é conhecido que no destino final dos REEE existem três opções: reuso, remanufatura e reciclagem. Segundo Bettanin (2017), o reuso é recomendado quando o desempenho do resíduo está abaixo das necessidades do consumidor original, mas pode atender às necessidades de outros consumidores (como escolas e instituições de caridade), sem demandar quaisquer modificações no resíduo. Na remanufatura, as peças dos resíduos são utilizadas na produção de equipamentos novos e seminovos, de modo que os resíduos são desmontados, passam por um processo de limpeza e reparação e, são, então, remontados em outro produto. Na reciclagem, os resíduos passam por procedimentos cujo objetivo é obter materiais de valor.

Neste trabalho, será aprofundada apenas a reciclagem, que, de acordo com Ghizoni (2016), é a principal escolha para o tratamento dos resíduos fotovoltaicos, uma vez que está associada à redução da matéria-prima que será demandada no futuro.

3 MÉTODO

Para a elaboração deste trabalho, foi realizado o levantamento de estudos que tratam de reciclagem dos painéis fotovoltaicos. As bases de dados definidas para a busca foram: Scielo; Periódicos CAPES; banco de teses da CAPES; Google Scholar e sites comerciais. Como termos de busca, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: energia solar; módulo fotovoltaico; resíduo eletrônico; EVA; fotovoltaic; photovoltaic technology; solar panels; recycling; waste generation.

Os processos e técnicas sugeridos pelos estudos foram resumidos, permitindo comparações e discussões. Por fim, foram discutidos quais são os desafios e potencialidades da implementação da reciclagem em escala industrial no Brasil, considerando tanto o cenário legislativo e governamental quanto técnico e operacional.

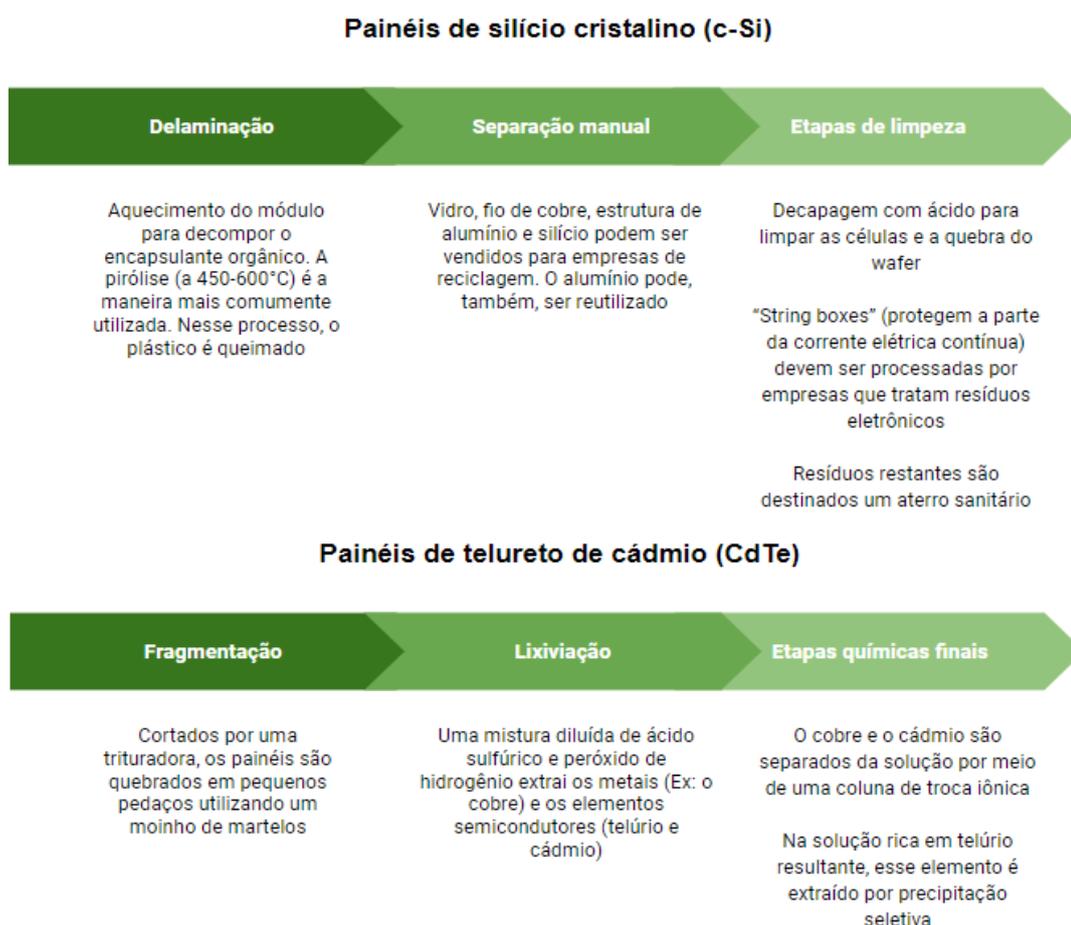
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram organizados em dois subtópicos, sendo um sobre as tecnologias de reciclagem e o outro sobre a implementação das propostas no Brasil.

4.1 TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM PROPOSTAS PARA O GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS PELO DESCARTE DOS PAINÉIS

De acordo com Anselmo (2019), embasado pelo trabalho de Fthenakis (2018), existem técnicas de reciclagem bem testadas para painéis c-Si e CdTe, porém não para outros. Para ambos, o processo de reciclagem é iniciado com a desmontagem do painel, separando as caixas de junção (e as estruturas de alumínio para o c-Si). As próximas etapas se diferenciam entre os painéis, conforme se observa na Figura 5, que sumariza as descrições realizadas por Anselmo (2019).

Figura 5 – Diagramas do processo de reciclagem dos painéis de silício cristalino (c-Si) e de telureto de cádmio (CdTe)



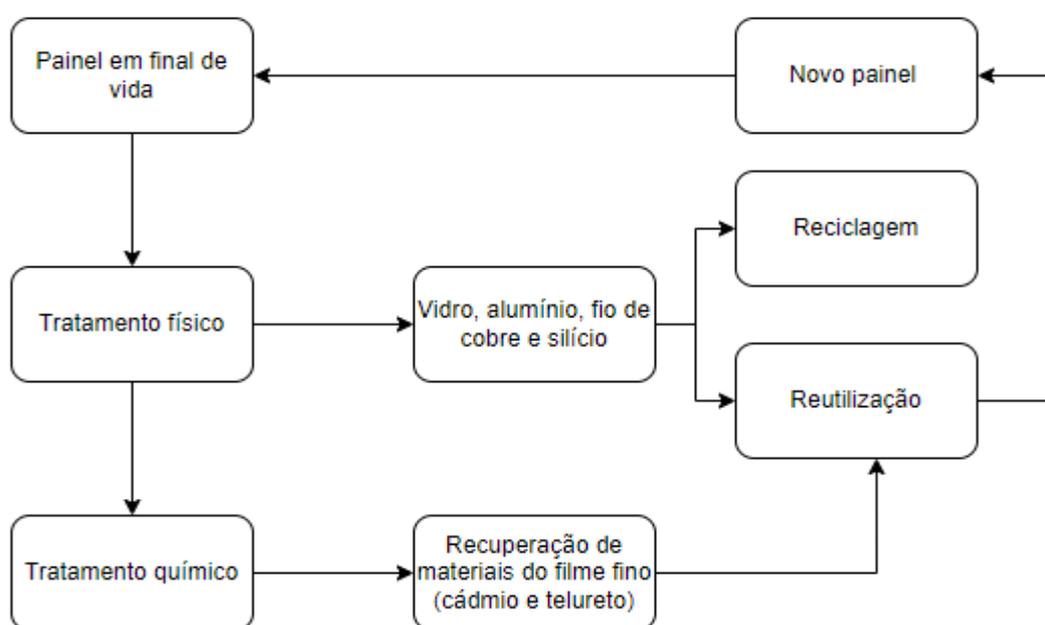
Fonte: autoria própria.

Comparando os processos sintetizados nos diagramas da Figura 5, fica claro que a reciclagem permite a reutilização da estrutura de alumínio (para os painéis c-Si), dos elementos semicondutores (para painéis CdTe) e do vidro para ambos. Conseqüentemente, a demanda por esses materiais pode ser reduzida na produção dos painéis, ao passo que o custo dos painéis pode ser diminuído, como apontou Anselmo (2019).

Também é possível notar que ambos os processos envolvem a combinação de tratamentos físicos (ex: separação manual; fragmentação) e, principalmente, químicos (ex: delaminação; decapagem; lixiviação; eletrólise). Essa observação é condizente com a discussão de Coelho e Serra (2018). Embora os autores tenham focado na descrição de alguns métodos existentes para a reciclagem de painéis c-Si, eles apresentaram discussões que podem ser estendidas aos painéis CdTe também. Por exemplo, permitem entender que tanto o tratamento físico quanto o químico são boas opções para a recuperação de alguns materiais para reutilização, mas que o resultado pode ser melhor ainda quando ambos são associados.

Um fluxograma dos tratamentos físicos e químicos que podem ser aplicados ao final do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, considerando tanto o c-Si quanto o CdTe, é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma simplificado dos tratamentos físico e químico dos painéis fotovoltaicos em final de vida



Fonte: adaptado de CHOWDHURY *et al.* (2020).

Em uma revisão atualizada sobre a geração e gerenciamento de resíduos de painéis FV, Chowdhury *et al.* (2020) resumem quais são as tecnologias de reciclagem disponíveis atualmente para painéis de silício e de filme fino. Delas, apenas duas estão disponíveis comercialmente: o método aplicado a painéis c-Si por uma empresa na Alemanha (Deutsche Solar) e o aplicado a painéis de filme fino pela First Solar, com sede nos Estados Unidos. Esses métodos são, respectivamente, constituídos pelos mesmos processos de reciclagem descritos por Anselmo (2019) e resumidos na Figura 5 (para painéis c-Si e CdTe).

A despeito das vantagens dos métodos sumarizados na Figura 6, vale destacar que as desvantagens também existem. Entre os exemplos mencionados por Chowdhury *et al.* (2020) estão: geração de pó que contém vidro nos processos físicos, sendo o processo tóxico e gerador de poluição sonora; emissão de óxido de nitrogênio e outros gases nocivos, devido à separação da camada de EVA por solventes inorgânicos, o que pode ser um risco à saúde se forem inalados. Diante dessas desvantagens, pode-se compreender que Chowdhury *et al.* (2020) apresentam uma perspectiva semelhante à de Coelho e Serra (2018) ao afirmarem que os métodos térmicos e químicos são uma tecnologia combinada e avançada. Entretanto, Chowdhury *et al.* (2020) ainda destacam que, além de consumirem muita energia, esses métodos produzem gases tóxicos.

Paralelamente, outros métodos têm sido objeto de estudos realizados em laboratórios. Nos estudos internacionais, foram alvo os painéis de filme fino (FTHENAKIS; WANG, 2006; MARWEDE *et al.*, 2013; TAO; SU, 2015), os painéis c-Si (BRUTON, 1994) e ambos (BERGER *et al.*, 2010; DOI *et al.*, 2001; GRANATA *et al.*, 2014; KIM; LEE, 2012; LATUNUSSA *et al.*, 2016; SHIN *et al.*, 2017). Na revisão realizada por Chowdhury *et al.* (2020), é possível observar com mais detalhes quais foram as tecnologias de reciclagem utilizadas, em estudos internacionais, para painéis de silício e de filme fino, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma. Os quadros 1 e 2 apresentam uma adaptação, com tradução livre, da revisão realizada por Chowdhury *et al.* (2020).

Quadro 1 – Tecnologias de reciclagem de painéis de silício

Tecnologia	Processo	Vantagens	Desvantagens
Delaminação	Desintegração física	Tratamento eficiente de resíduos	Outros materiais se misturam com o EVA; células solares danificadas; decomposição de aparelhos
	Dissolução diluente	Remoção da camada orgânica do vidro; reutilização química de resíduos; remoção simples de EVA	Tempo necessário para a delaminação depende da área; equipamento caro; perigoso para a saúde humana
	Dissolução de ácido nítrico	Remoção completa do EVA e da camada de metal do wafer; possível recuperação total da célula	Emissões perigosas; defeitos celulares devido ao ácido inorgânico
	Tratamento termal	EVA totalmente eliminado; ao reutilizar wafers, é possível recuperar células inteiras	Demanda alto consumo de energia; emissões perigosas
	Irradiação ultrassônica	Usada como um processo suplementar para acelerar o processo de dissolução; remoção simplificada do EVA	Processo muito caro; tratamento de soluções residuais
Separação de material	Processo mecânico seco e úmido	Processo não químico e simples; requer baixo consumo de energia; equipamento disponível	Sem remoção de sólidos dissolvidos
	Gravura	Processo simples e eficaz; recuperação de materiais de alta pureza	Demanda alta energia, devido às altas temperaturas; uso de produtos químicos

Fonte: adaptado de Chowdhury *et al.* (2020), com tradução livre.

Quadro 2 – Tecnologias de reciclagem de painéis de filme fino

Tecnologia	Processo	Vantagens	Desvantagens
Delaminação	Desintegração física	Permite obter vários resíduos por tratamento (módulos split, submódulos e módulos laminados)	Mistura das várias frações de materiais; perda de cada fração de material; vidro parcialmente combinado com o EVA; quebra de células solares
	Dissolução diluente	Camada orgânica removida do vidro; soluções de reprocessamento; remoção simples de EVA	O tempo necessário para a delaminação depende da área; o EVA ainda adere à superfície do vidro
Separação de material	Tratamento termal	Eliminação completa do EVA; recuperação completa da célula reutilizando wafers	Alto consumo de energia; emissões perigosas
	Radioterapia	Fácil eliminação do EVA	Procedimento lento; processo caro
	Erosão	Não demanda produtos químicos; o vidro pode ser recuperado	Demanda tratamento adicional de pré-purificação
	Jateamento à vácuo	Remoção da camada semicondutora sem dissolução química; o vidro pode ser recuperado	Emissão de frações metálicas; longo tempo de processamento
	Processo mecânico seco e úmido	Processo não químico; procedimento simples e com baixo consumo de energia; aparelho geralmente disponível	Sem remoção de sólidos dissolvidos
	Química tensoativa	Os tensoativos são reutilizáveis; metais são totalmente removidos do vidro	As emulsões devem ser adaptadas a diferentes tecnologias celulares; o tempo de delaminação depende da área
	Lixiviação	Eliminação completa do metal do vidro; possível extração adicional de soluções metálicas	Alto uso de produtos químicos; controle complicado das reações químicas
	Flotação	Método relativamente fácil; uso limitado de produtos químicos	Alta demanda de energia, devido às altas temperaturas; uso químico
	Gravura	Recuperação de materiais de alta pureza; baixo custo e processo eficaz	Alta demanda de energia, devido às altas temperaturas; uso químico
Purificação de material	Hidrometalúrgico	Aplicável comercialmente; emissões baixas e controláveis; fácil gerenciamento de água	Muitas etapas de separação e absorção; as etapas do processo químico devem ser adaptadas à respectiva tecnologia
	Pirometalúrgico	Processo industrial consolidado; a matéria prima pode conter diferentes materiais	Alto rendimento necessário; perda de alguns materiais na escória; metais pesados ou materiais indesejados

Fonte: adaptado de Chowdhury *et al.* (2020), com tradução livre.

A observação dos Quadros 1 e 2 permite destacar que em todas as tecnologias de reciclagem foram observadas vantagens e desvantagens. Entre essas últimas, o alto consumo de energia e emissões perigosas também são exemplos consequentes de alguns dos procedimentos.

Considerando, especificamente, a reciclagem dos módulos c-Si, Miranda (2019) resumiu, de forma geral, diferentes métodos de tratamento que encontrou na literatura (Quadro 3).

Quadro 3 – Métodos de reciclagem de módulos fotovoltaicos do tipo c-Si encontrados na literatura

Tecnologia/ Processo	Vantagens	Desvantagens
Dissolução em solvente orgânico	Fácil remoção do EVA Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio Custos equipamentos
Calor /Eletrotérmico	Fácil remoção do vidro	Processo lento
Separação mecânica	Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV
Pirólise	Recuperação de materiais - 80% do sanduíche e 100% do vidro Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células FV
Dissolução em solvente (ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduíche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV
Mecânico (seco e úmido)	Minimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas

Fonte: adaptado de Miranda (2019).

O Quadro 4 reúne uma síntese de alguns estudos brasileiros encontrados, apresentando as vantagens e desvantagens acerca dos processos que foram empregados em cada um.

Quadro 4 – Estudos realizados no Brasil acerca da reciclagem de painéis fotovoltaicos, apresentando seus objetivos e processos empregados, bem como considerações acerca das vantagens e desvantagens (continua)

Estudos - Objetivos	Processos	Vantagens	Desvantagens
Bettanin (2015) - Extrair a prata contida em painéis c-Si	Processamento mecânico utilizando chave de fenda, alicate e serra elétrica	Remoção das molduras dos painéis	Demanda por automação industrial, alta demanda de mão de obra**
	Moagem para fazer a cominuição dos painéis	Equipamentos e tecnologia de fácil acesso no Brasil, como moinho granulador ou moinho de impacto; baixo gasto energético**	Alto custo de manutenção nos equipamentos**
	Separação granulométrica utilizando peneiras de <i>mesh</i>	Obtenção de três frações de amostras	Alto tempo de agitação para grandes quantidades de massa do material (15 minutos para cada 300 g)**
	Lixiviação, sendo que um sistema utilizou ácido nítrico e o outro, tiosulfato	Ambas as soluções apresentaram rendimentos próximos, indicando a possibilidade de substituir o ácido nítrico por tiosulfato como agente lixiviante (menor consumo de reagente, possibilitando economia); a prata foi recuperada pelo uso dos dois agentes e não se observou variação significativa	A lixiviação com tiosulfato é um sistema complexo, demandando um rígido controle de todas as variáveis no processo, pois pode haver precipitação e redissolução dos metais envolvidos na reação
DIAS (2015)* - Estudar rotas de extração de prata nos módulos de silício	Separação granulométrica	Eficaz para obter frações concentradas de prata e cobre	Estanho e chumbo não se acumularam em nenhuma fração; a otimização do processo demanda divisão das frações do material cominuído e/ou uso de peneiras/grades específicas
	Lixiviação com ácido nítrico, seguida da precipitação com cloreto de sódio	Foi possível concentrar, em média, 93,91% da prata de uma fração	Nem toda a prata foi concentrada
	Pirólise	30 minutos foi o menor tempo que garantiu a pirólise completa	O dado é válido para amostras com cerca de 9 g, sendo necessário investigar o resultado em escalas maiores

Quadro 4 – Estudos realizados no Brasil acerca da reciclagem de painéis fotovoltaicos, apresentando seus objetivos e processos empregados, bem como considerações acerca das vantagens e desvantagens (continuação)

Estudos - Objetivos	Processos	Vantagens	Desvantagens
SCHMIDT; BERNARDES (2017) - Avaliar o separador eletrostático com o objetivo de reciclar o resíduo fotovoltaico e recuperar materiais valiosos presentes no módulo fotovoltaico	Moagem do módulo	Baixa geração de resíduos, baixo custo de instalação e manutenção dos equipamentos**	Poluição sonora no caso industrial, por conta do grande volume**
	Separação eletrostática em condutores, semicondutores e não condutores	Eficiência na separação da fração metálica, que fica concentrada no compartimento condutor	Ineficiência na separação da fração polimérica, que fica dispersa em todos os compartimentos
MACHADO; VEIT (2017) - Avaliar a separação por solvente orgânico para segregação dos principais componentes presentes nos módulos	Separação por solvente, emergindo o módulo em tolueno à temperatura ambiente por 7 dias. Na sequência, sob aquecimento a 90°C durante um dia	Pelo menos, metade dos materiais foram separados	Alto tempo para que a separação ocorra; alta volatilidade do tolueno, demandando uso de um recipiente com método de vedação eficaz para emergir o módulo no tolueno. Métodos de vedação precisam ser estudados
PRADO (2018)* - Recuperar os materiais presentes nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino e de silício amorfo	Cominuição seguida de separação e recuperação dos polímeros pela dissolução de solventes de Hildebrand	Baixo custo de instalação e manutenção dos equipamentos**	Dificuldade no tratamento dos resíduos gerados pelos solventes de Hildebrand**
	Lixiviação da prata com ácido sulfúrico, sob adição de peróxido de hidrogênio, seguida de precipitação em solução de cloreto de prata com adição de cloreto de sódio	Alcançou-se 100% de lixiviação em 2h	A diminuição da temperatura de 95°C para 30°C aumentou o tempo para a lixiviação completa em 4h
	Calcinção a 400°C	Remoção do EVA na fração polimérica do módulo de silício amorfo	Demanda uma temperatura elevada
	Lixiviação de índio	Foi de 100% para uma solução 1 mol.L ⁻¹ de ácido fosfórico a 75°C	Demanda uma temperatura elevada

Quadro 4 – Estudos realizados no Brasil acerca da reciclagem de painéis fotovoltaicos, apresentando seus objetivos e processos empregados, bem como considerações acerca das vantagens e desvantagens (continuação)

Estudos - Objetivos	Processos	Vantagens	Desvantagens
CAMARGO (2021)* - Propor uma rota de tratamento térmico e mecânico no tratamento de unidades de módulos c-Si, sem cominuição, que foram cortadas em amostras de 8 x 8 cm	Remoção manual do backsheet (pré-tratamento mecânico), utilizando uma fresa sobre bancada de trabalho rígida	Backsheet completamente removido, com poucos pontos danificados; possibilidade de aplicação independentemente da composição química do backsheet; não demanda tratamento de ácido fluorídrico e outros subprodutos; redução do tempo de tratamento térmico em 78%; evitação da queima de composto orgânico fluorado; economia de energia; <u>redução de emissões gasosas</u>	Ajustes de altura do suporte tupia precisam estar adequados para que não danifiquem o restante do módulo; necessidade de automatização do sistema para remoção mais rápida, precisa e de implementação em escala industrial
	Tratamento térmico a 500°C das amostras de 8 x 8 cm	Decomposição do EVA em 20 minutos (menor tempo de forno); maiores concentrações de prata e silício e de vidro; evitou a queima do PVF e, portanto, emissões de HF, benzeno e dioxinas, de modo que esse processo não demandaria tratamento de gases. Para uma escala industrial, ofereceria economia de energia e aumento da produtividade	As emissões gasosas ainda precisam ser mais investigadas e analisadas para validar as informações observadas, sobretudo em relação a um maior número de amostras de unidades de módulos fotovoltaicos
	Tratamento térmico a 500°C das amostras de 8 x 8 cm	Decomposição do EVA em 20 minutos (menor tempo de forno); maiores concentrações de prata e silício e de vidro; evitou a queima do PVF e, portanto, emissões de HF, benzeno e dioxinas, de modo que esse processo não demandaria tratamento de gases. Para uma escala industrial, ofereceria economia de energia e aumento da produtividade	As emissões gasosas ainda precisam ser mais investigadas e analisadas para validar as informações observadas, sobretudo em relação a um maior número de amostras de unidades de módulos fotovoltaicos
DIAS; VEIT (2018) - Descrever um método de remoção e recuperação da prata presente nos módulos de silício cristalino	Filtração para separar a fração fina resultante da cominuição do módulo (após remoção da moldura)	Pode ocorrer por peneira ou outros métodos que incluem a vibração, mas não se limitam a ela	Necessidade de um filtro autolimpante de escala industrial (alto custo)**

Quadro 4 – Estudos realizados no Brasil acerca da reciclagem de painéis fotovoltaicos, apresentando seus objetivos e processos empregados, bem como considerações acerca das vantagens e desvantagens (conclusão)

Estudos - Objetivos	Processos	Vantagens	Desvantagens
DIAS; VEIT (2018) - Descrever um método de remoção e recuperação da prata presente nos módulos de silício cristalino	Lixiviação do material, utilizando ácido nítrico concentrado em temperatura ambiente	Separação da solução líquida do produto da lixiviação; descarte da parte sólida residual	Dificuldade no tratamento dos efluentes para descarte**
	Adição de cloreto de sódio à fase líquida resultante	Precipitação seletiva da prata	Necessidade de repetir o procedimento enquanto houver precipitação
	Enxague e secagem do precipitado (pó branco)	Pode ocorrer por secagem natural ou com auxílio de estufa; cerca de 92-94% de recuperação da prata lixiviada	Na estufa, demanda certo gasto de energia; na secagem natural, demanda tempo; necessidade de um secador tipo esteira**

Fonte: autoria própria.

Notas: * Estudou diferentes rotas. Na tabela, foi citada a melhor rota indicada pelo estudo.

** Vantagens/desvantagens compreendidas e descritas pelo autor, porém não explicitadas na referência original.

A observação do Quadro 4 permite a reflexão de que, no Brasil, há poucos estudos publicados acerca de processos, sendo possível notar um foco na reciclagem de painéis FV de primeira geração, possivelmente por este tipo constituir a maioria do mercado atual. Ao mesmo tempo, parece haver um especial interesse na extração da prata, por se tratar de uma matéria-prima valiosa.

4.2 DESAFIOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS PROPOSTAS NO BRASIL

Atualmente, um dos principais aspectos que dificulta a implementação de forma industrial da reciclagem dos painéis fotovoltaicos no Brasil, bem como em muitos outros países do mundo, é a viabilidade econômica. Os processos testados de reciclagem apresentam custos elevados. Uma vez que o volume de resíduos produzidos ainda é baixo no Brasil, o envio deles ao aterro pode, muitas vezes, constituir uma alternativa mais barata, como destaca Miranda (2019). O estudo da Rystad Energy (2022) também corrobora essa perspectiva sobre os aterros, indicando

que os custos de transporte, classificação e processamento não são compensados pelos preços atuais da revenda dos materiais fotovoltaicos reciclados.

Outro desafio observado ao longo da discussão sobre a reciclagem neste trabalho é a existência de diferentes tipos de painéis, pois não existem tecnologias disponíveis para a reciclagem de todos os tipos até o momento. Corcelli *et al.* (2018) também apontou esse obstáculo, retomando que poucas dessas tecnologias estão totalmente disponíveis e automatizadas para uso em escala industrial. De fato, como já mencionado anteriormente, só existem dois processos em operação, sendo um para painéis c-Si (na Deutsche Solar) e o outro para painéis CdTe (na First Solar).

No Brasil, os estudos referentes aos processos de reciclagem de painéis fotovoltaicos são incipientes e se mostraram limitados à extração e recuperação de metais dos painéis de primeira geração, principalmente da prata. Permanece, assim, a dúvida: que outros métodos poderiam ser combinados para extrair e tratar os demais componentes?

A despeito dessas dificuldades, o crescimento da utilização dos painéis FV no Brasil é uma realidade, sendo inevitável a geração dos resíduos após o descarte dos painéis dentro de alguns anos. Nesse futuro, se a principal forma de gerenciamento dos resíduos ainda for o envio para os aterros, a capacidade deles será sobrecarregada, aumentando, também, os riscos à saúde pública e ao meio ambiente já discutidos. Ou seja, o problema com o gerenciamento já é previsto no Brasil, não havendo razões para aguardar que ele seja uma realidade para só então se buscar estratégias de solução.

A boa notícia é que expectativas otimistas são, de certo modo, propiciadas no país, tanto por leis quanto por iniciativas de empresas do setor. Até o momento, não existe uma legislação específica para a reciclagem de painéis solares no Brasil. No entanto, pode-se entender que a Lei nº 12.305/10 de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) incentiva a busca da destinação adequada dos resíduos dos painéis na medida em que apresenta como objetivos principais:

- I - Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II - Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;

IV - Adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;

V - Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;

VI - Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;

VII - gestão integrada de resíduos sólidos;

VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;

IX - Capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;

X - Regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira;

XI - Prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:

a) produtos reciclados e recicláveis;

b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;

XII - Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;

XIII - Estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;

XIV - Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;

XV - Estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

De forma resumida, a PNRS estimula fornecedores a se tornarem responsáveis pelos seus próprios resíduos, o que é chamado de logística reversa. Em decorrência dessa logística, muitas empresas criaram postos de coleta de resíduos sólidos. A SunR, pioneira no Brasil, por exemplo, foi criada com o objetivo de promover a logística reversa do setor fotovoltaico brasileiro. Por meio de parcerias em cada um dos estados brasileiros, ela coleta os módulos fotovoltaicos danificados; processa-os mecanicamente (sem utilizar processos químicos e térmicos) e seleciona os materiais separados do módulo, dando destino correto a cada um; direciona materiais reciclados

para serem inseridos novamente na cadeia produtiva. Em janeiro de 2023, as informações no site da empresa indicaram que ela é a número 1 na América Latina, atende a 27 estados brasileiros, possui 12 parcerias e apresenta um processo de reciclagem com 92% de aproveitamento.

Paralelamente, diferentes empresas e associações de fabricantes de painéis solares iniciaram parceria com a Recicla E-Waste Company Brasil, localizada em Curitiba (Paraná), que atua no recolhimento de lixo eletrônico no país e adota o processo de logística reversa e reciclagem (COMPANY BRASIL, S. I). A ALDO, por exemplo, é uma das parceiras e recebe painéis solares quebrados e outros componentes dos painéis, providenciando a destinação correta tanto por meio da reciclagem quanto pelo descarte responsável (NERIS, 2020).

Em 2020, quando sete galpões da Stolf Utilidades Domésticas foram danificados pelo ciclone bomba no Rio do Sul (Santa Catarina), apenas 869 dos 2 mil painéis solares que forneciam energia à empresa ficaram intactos. A ALDO se encarregou de destinar os painéis danificados à Recicla E-Waste Company (NERIS, 2020). Esse caso ainda leva à reflexão de que os resíduos dos painéis solares podem demandar gerenciamento precoce, isto é, antes de atingirem o fim de vida, dado que podem ser danificados por desastres naturais inesperados também. Embora não se possa prever com exatidão a probabilidade desses desastres ocorrerem, é válido prever opções de gerenciamento dos resíduos para caso de acontecerem.

Todavia, cabe destacar que a iniciativa da logística reversa também é insuficiente na medida em que nem todos os consumidores buscam pelos postos de coleta das empresas, ocasionando elevada quantidade de descartes indevidos de resíduos eletrônicos (PUPIN, 2019). Com os painéis solares, é possível supor que não é diferente, o que alerta para a importância de os consumidores serem constantemente informados sobre os riscos do descarte indevido, assim como instruídos a procurar pelos postos de coleta.

A postura do consumidor/usuário se configura, portanto, como mais uma dificuldade com a qual a implementação da reciclagem no Brasil se depara. De acordo com Pupin (2019), o usuário precisa se responsabilizar por levar os painéis em fim de vida útil para o fabricante ou distribuidor, para que este, por sua vez, comprometa-se com a reciclagem e/ou reutilização. Nesse contexto, o presente trabalho pode contribuir ao apresentar dados e divulgar o tema, incentivando a responsabilização sugerida por Pupin (2019).

Em Ministério de Minas e Energia (MME), em parceria com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), lançou o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, atualizado em agosto de 2022. O PNE é um importante instrumento de planejamento por reunir estudos que fundamentam estratégias a longo prazo, considerando escolhas de políticas energéticas. Ao acessar o Painel PNE 2050, é fácil identificar a preocupação com a utilização da energia solar (Quadro 5), pois, para cada tema abordado, são listados: os desafios com potencial de afetar o desenho da estratégia de atuação do tomador de decisão no setor de energia no longo prazo; recomendações repartidas nos próximos decênios.

Quadro 5 – Desafios, recomendações e ações em relação ao uso da energia solar apontados no Painel PNE 2050, considerando os decênios de 2020 a 2030 e de 2030 a 2040

Desafio	Recomendações	Ação	Resumo da ação
Lidar com o descarte e reciclagem de equipamentos	Articular com diferentes atores governamentais e setoriais para endereçar a regulação relativa à reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico	Decreto n. 10.936, de 12 de janeiro de 2022	Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos
		Decreto n. 11.043, de 13 de abril de 2022	Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), que é um instrumento para melhoria da gestão de resíduos sólidos no país, com diretrizes e metas nacionais
		Decreto n. 11.044, de 13 de abril de 2022	Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem - Recicla+

Fonte: adaptado do Painel PNE 2050 (BRASIL, 2022).

É amplamente discutido que a Política Nacional de Resíduos Sólidos, sozinha, é insuficiente para garantir a implementação da reciclagem em escala industrial (GUIMARÃES *et al.*, 2021; OLIVEIRA, 2021; SOARES, 2017). Ainda assim, foi apresentado que já existem, no Brasil, empresas dedicadas à reciclagem de painéis solares.

É fato que, no mundo, um longo caminho ainda precisa ser percorrido para superar os diferentes desafios associados à reciclagem, considerando que apenas a Europa possui recicladores focados puramente em painéis (ABSOLAR, 2020). Contudo, este trabalho apresentou dados que favorecem expectativas otimistas, pois

um certo movimento crescente de incentivo à reciclagem pôde ser observado no Brasil.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) mencionado no Quadro 5, constitui uma ferramenta para alcançar os objetivos da PNRS ao propor, por exemplo, que metade do lixo gerado passará a ser reaproveitado em vez de aterrado. O certificado Recicla +, por sua vez, tem o potencial de funcionar como uma espécie de premiação para pessoas jurídicas que realizarem a coleta, tratamento e destinação final adequada dos resíduos passíveis de logística reversa. Com a elaboração e implementação de legislações específicas para o mercado da energia solar, como as existentes na União Europeia, o cenário tende a se tornar ainda mais incentivador. Certamente, a existência de uma lei não garante que ela seja executada. Mas, ao estabelecer exigências específicas, ela poderá fomentar um esforço ainda maior para que a reciclagem ocorra. A União Europeia, por exemplo, exige que, pelo menos, 75% do material dos painéis seja recuperado.

Do ponto de vista econômico, McDonald e Pearce (2010) concluíram que a reciclagem não é vantajosa. Em contrapartida, Anselmo (2019) descreve que a reciclagem fotovoltaica de painéis c-Si e CdTe é técnica e economicamente viável. Diante desses dados discrepantes, observa-se uma lacuna de conhecimento sobre os reais custos envolvidos. De todo modo, a perspectiva de não haver vantagem econômica é passível de questionamento, dadas as possíveis vantagens potenciais para o mercado, sendo possível listar: redução de custos de fabricação dos painéis; menor demanda por minerais; maior competitividade das empresas, devido à preocupação com a sustentabilidade que pode melhorar a imagem delas perante o consumidor; geração de empregos pela demanda de mão de obra e conhecimentos técnicos; arrecadação de tributos.

Inclusive, de acordo com estimativas de Kadro e Hagfeldt (2017) e IRENA (2016), é possível que as matérias-primas recuperadas na reciclagem de painéis FV possam render mais de 15 milhões de dólares, o que seria equivalente a 2 bilhões de painéis ou 630 GW. Ou seja, há indícios numéricos para a vantagem de reinserir materiais na cadeia de fabricação fotovoltaica, como também destacou Camargo (2021). Essa vantagem é especialmente importante para reduzir a demanda por minerais e metais, que aumentará com a expansão da energia solar FV. Na projeção realizada em 2021 pela International Energy Agency (IEA), no período de 2020 a 2040, a demanda de cromo crescerá 75 vezes (para 91,5 kt), a de cobre 68 vezes (para 42,2

kt), a de manganês 92 vezes (para 105,2 kt), a de níquel 89 vezes (para 34,5 kt) e a de outros minerais 84 vezes (para 58,9 kt).

No Quadro 6, é possível observar as opções de destino para cada componente do painel após o final do processo de reciclagem, facilitando a compreensão do valor que é possível agregar à reciclagem.

Quadro 6 – Possibilidades de destino dos componentes de painéis fotovoltaicos após o final do processo de reciclagem

Componente	Destino
Vidro	Indústria de vidro / Indústria FV Indústria de lâ de vidro Construção
EVA	Reutilização na indústria química Recuperação de energia da incineração
Semicondutor (1° geração)	Wafer com eficiência suficiente para produção de células FV Reutilização na indústria FV como semicondutor Utilização como agregados para forno de função metalúrgica
Materiais estratégicos	Reutilização com seu nível de pureza original
Alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original

Fonte: adaptado de GHIZONI (2016).

Ainda assim, ao se considerar o fator econômico como um grande entrave, existe, na Europa, uma iniciativa que pode inspirar rotas para a redução de custos no processo de reciclagem. O PV Cycle, criado pela indústria fotovoltaica em 2007, é uma organização sem fins lucrativos, baseada em membros, que oferece gerenciamento de resíduos coletivo, personalizado e em conformidade legal para empresas e detentores de resíduos no mundo todo. Os resíduos tratados pela PV Cycle incluem painéis fotovoltaicos e, como a abordagem é coletiva e o “*know-how*” é especializado, os custos são reduzidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho verificou que diferentes metodologias de reciclagem de painéis FV têm sido testadas em laboratório, mas apenas duas são utilizadas comercialmente: a da Deutsche Solar na Alemanha para painéis c-Si e constituída pela delaminação, separação manual e etapas de limpeza; a da First Solar com sede nos Estados Unidos para painéis CdTe e constituída pela fragmentação, lixiviação e tratamentos químicos finais.

Para o contexto brasileiro, foi enfatizada a importância de haver uma legislação específica para a reciclagem dos painéis FV, de difundir conhecimento sobre os riscos de descarte inadequado e de fiscalizar o descarte, favorecendo a logística reversa. Igualmente, foi evidenciada a pertinência de pesquisas sobre novas metodologias de reciclagem, a fim de reduzir os desafios metodológicos no processo e os riscos à saúde e ao meio ambiente; bem como sobre os custos envolvidos no processo de reciclagem, avaliando comparativamente os gastos com diferentes tecnologias, além de ponderar suas vantagens e desvantagens. Em conjunto, essas estratégias poderão auxiliar no planejamento das políticas de energia nacionais em relação à fonte solar, que poderão incluir a implementação da reciclagem em escala industrial no Brasil.

Este trabalho também evidencia a complexidade da reciclagem de painéis FV, que exige amplo conhecimento das propriedades físico-químicas dos materiais e dos processos químicos envolvidos. Nesse contexto, a atuação do engenheiro químico é essencial para garantir a eficiência e a segurança do processo, uma vez que envolve a manipulação de substâncias como ácidos e metais pesados, que requerem conhecimento técnico específico para evitar danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Ademais, cabe ao engenheiro químico a responsabilidade pela avaliação e seleção das tecnologias mais adequadas para cada etapa do processo de reciclagem, considerando a eficiência, custo e impacto ambiental. Desse modo, o profissional atualizado sobre as tecnologias e técnicas disponíveis pode contribuir para a realização de uma reciclagem mais sustentável e eficiente, possibilitando a economia de recursos naturais e o desenvolvimento da indústria de energia renovável de forma mais responsável e consciente.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Geração distribuída fotovoltaica cresce 230% ao ano no Brasil**. 24 jul. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-fotovoltaica-cresce-230-ao-ano-no-brasil/>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- ABSOLAR. **A reciclagem de painéis solares tem um longo caminho a percorrer, e o silício pode ser a chave**. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/a-reciclagem-de-paineis-solares-tem-um-longo-caminho-a-percorrer-e-o-silicio-pode-ser-a-chave>. Acesso em: 14 jan. 2023.
- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR**. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- ANSELMO, A. H. **Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida**. 2019. 58 p. Monografia — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- BERGER, W. *et al.* A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. **Resour. Conserv. Recycl**, v. 54, n. 10, p. 711-718, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.001>.
- BETTANIN, A. **O uso de tiosulfato para a recuperação de prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. 2017. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, [S. I.], 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- BRASIL. **Plano de Expansão Decenal 2029**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022**. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.043-de-13-de-abril-de-2022-393566799>.
- BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com/pne-faq/shiny.html>. Acesso em 14 jan. 2023.
- BRASIL. **Decreto nº 11.044, de 13 de abril de 2022**. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem - Recicla+. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.044-de-13-de-abril-de-2022-393553968>.
- BROUWER, K. A.; GUPTA, C.; HONDA, S. **Methods and Concerns for Disposal of Photovoltaic Solar Panels**. 2011. 77 p. Dissertação (Mestrado) —

San Jose State University, San Jose, 2011.

BRUTON, T. Re-cycling of high value, high energy content components of silicon PV modules. *In: Proceedings of 12th EC-PVSEC, 1994, Nice, France, p.303–304. PVSEC.*

CAMARGO, P. S. S. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino: separação e concentração de materiais.** 2021. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

CASTRO, S. V. **Efeitos de metais pesados presentes na água sobre a estrutura das comunidades bentônicas do Alto Rio das Velhas - MG.** 2006. 110p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CHOWDHURY, S. *et al.* An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, v. 27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>

COELHO, T. F.; SERRA, J. C. V. Tecnologias para reciclagem de sistemas fotovoltaicos: impactos ambientais. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 15, n. 7, 2018.

COMPANY BRASIL. **Logística reversa de painéis fotovoltaicos.** Disponível em: https://www.reciclaeletronicos.com.br/paineis_solares.html. Acesso em: 14 jan. 2023.

CORCELLI, F. *et al.* Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 37-51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.028>.

D'ADAMO, I.; MILIACCA, M.; ROSA, P. Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. **Int. J. Photoenergy**, v. 2017, p. 1-7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>.

DIAS, P. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos: Painéis solares.** 2015. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DIAS, P. R.; VEIT, H. M. **Método de remoção e recuperação do metal de prata de módulos fotovoltaicos de silício cristalino de primeira geração.** Depósito: 26 out. 2016. Concessão: 15 maio 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/180052/001070568.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 jan. 2023.

DOI, T. *et al.* Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 67, n. 1-4, p. 397-403, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00308-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00308-1).

EBBING, D. **Química Geral**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v. 2.

EUROPEAN UNION. **Directive 2012/19/eu of the european parliament and of the council**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704%3E>. Acesso em: 18 dez. 2022.

FTHENAKIS, V.; WANG, W. Extraction and separation of Cd and Te from cadmium telluride photovoltaic manufacturing scrap. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 14, n. 4, p. 363-371, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.676>.

FTHENAKIS, V. M.; LYNN, P. A. **Electricity from Sunlight: Photovoltaic-Systems Integration and Sustainability**. 2. ed. [S. l.]: Wiley, 2018. 360 p.

GHIZONI, J. P. **Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil**. 2016. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GRANATA, G. *et al.* Recycling of photovoltaic panels by physical operations. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 123, p. 239-248, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>.

GUIMARÃES, E. C. *et al.* Solar energy paradigms and waste generation. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 59923-59940, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-398>.

HUANG, W. *et al.* Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. **Solar Energy**, v. 144, p. 22-31, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001>.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 20 mar. 2023.

IRENA. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. 2016. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 3 dez. 2022.

KADRO, J.; HADFELDT, A. The End-of-Life of Perovskite PV. **Joule**, v. 1, n. 1, p. 29-46, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.013>.

KIM, Y.; LEE, J. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 98, p. 317-322, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.022>.

KLUGMANN-RADIEMSKA, E.; OSTROWSKI, P. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. **Renewable Energy**, v. 35, n. 8, p. 1751-1759, 2010.

LATUNUSSA, C. *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.

MACHADO, A. V. D.; VEIT, H. M. Painéis Fotovoltaicos - Caracterização e Reciclagem. *In*: XXIX Salão De Iniciação Científica da UFRGS, 2017, Porto Alegre. **XXIX Salão de Iniciação Científica da UFRGS**. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/176211>. Acesso em: 17 jan. 2023.

MARWEDE, M. *et al.* Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste—Current feasible processes. **Renewable Energy**, v. 55, p. 220-229, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.038>.

MCDONALD, N.; PEARCE, J. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. **Energy Policy**, v. 38, p. 7041-7047, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.023>.

MESTRE DA ENERGIA SOLAR. **Quais são os tipos de painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado**. 2021. Disponível em: <https://mestredaenergiasolar.com.br/quais-sao-os-tipos-de-paineis-fotovoltaicos-disponiveis-no-mercado/>. Acesso em: 18 dez. 2022.

MIRANDA, R. T. **Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos, utilizando o estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para comparar os impactos de duas estratégias de gestão de fim de vida**. 2019. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Energia) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

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

MULVANEY, D. **Solar Power: Innovation, Sustainability, and Environmental Justice**. Okland: University of California Press, 2019. 344 p.

NAKANO, V.; AVILA-CAMPOS, M. J. **Metais pesados: um perigo iminente**. S. I. Disponível em: http://www.icb.usp.br/bmm/mariojac/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=56&lang=br. Acesso em: 03 dez. 2022.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **The role of advancements in solar photovoltaic efficiency, reliability and costs**. 2016. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65872.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2022.

NERIS, A. **Reciclagem de painéis solares já é realidade na ALDO**. 2020. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/reciclagem-de-paineis-solares-ja-e-realidade-na-aldo/>. Acesso em: 14 jan. 2023.

OLIVEIRA, E. V. **Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração**. 2021. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65187>.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico**. S. I. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 03 ago. 2020.

PRADO, P. F. A. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. 2018. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PUPIN, P. C. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida**. 2019. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

PV Cycle. **European Association for the Recovery of Photovoltaic Modules - Annual Report 2012**. 2012. Disponível em: http://www.pvcycle.org.uk/wp-content/uploads/Annual-Report_2012_LR.pdf. Acesso em: 18 dez. 2022.

PV CYCLE. **The Association**. Disponível em: <https://pvcycle.org/about-pv-cycle/>. Acesso em: 16 mar. 2023.

RYSTAD ENERGY. **Reduce, reuse: solar PV recycling market to be worth \$2.7 billion by 2030**. 2022. Disponível em: <https://www.rystadenergy.com/news/reduce-reuse-solar-pv-recycling-market-to-be-worth-2-7-billion-by-2030>. Acesso em: 14 jan. 2023.

SCHMIDT, L. M.; BERNARDES, A. M. Avaliação e otimização da separação eletrostática na reciclagem de resíduo de módulos fotovoltaicos. *In: XXIX Salão De Iniciação Científica da UFRGS, 2017, Porto Alegre. XXIX Salão de Iniciação Científica da UFRGS*. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/177392>. Acesso em 17 jan. 2023.

SHIN, J.; PARK, J.; PARK, N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 162, p. 1-6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038>.

SICA, D. *et al.* Management off end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3., p. 2934-2945, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>. Acesso em: 10 ago. 2020.

SOARES, R. A. **Logística reversa dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil**. 2017. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

STEINER, K. H. **Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas**. 2020. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) — Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2020.

SUNR. **Reciclagem fotovoltaica. A energia solar ainda mais renovável**. Disponível em: <https://sunr.com.br/>. Acesso em: 14 jan. 2023.

TAO, J.; YU, S. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 141, p. 108-124, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.005>.

VALADARES, P. N. **A energia solar e os desafios para sua consolidação no Brasil e no mundo**. 2019. 31 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012. 224 p.

WANG, R.; XU, Z. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. **Waste Management**. v. 34, n. 8, p.1455-1469, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.004>.

WU, L.; TIAN, W.; JIANG, X. Silicon-based solar cell system with a hybrid PV module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 87, n.1-4, p. 637- 645, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.09.018>.