



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

LEDJANE MARIA ALVES OLIVEIRA

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS
OBTIDOS POR SEPARAÇÃO MECÂNICA**

Recife/PE

2023

LEDJANE MARIA ALVES OLIVEIRA

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS
OBTIDOS POR SEPARAÇÃO MECÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nathália Bezerra de Lima.

Orientadora Externa: Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho

Recife/PE

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Mônica Uchôa, CRB4-1010

O48e Oliveira, Ledjane Maria Alves
 Estudo e caracterização química de resíduos fotovoltaicos obtidos por separação
 mecânica / Ledjane Maria Alves Oliveira. – 2023.
 131 f.: il., fig., tab.

 Orientadora: Nathália Bezerra de Lima.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN, Ciência
 de Materiais, Recife, 2023.
 Inclui referências.

 1. Energias renováveis. 2. Módulos fotovoltaicos. 3. Reciclagem de materiais. 4.
 Composição química. I. Lima, Nathália Bezerra de (orientadora). II. Título.

620.19 CDD (23. Ed.) UFPE - CCEN 2023 – 210

LEDJANE MARIA ALVES OLIVEIRA

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS
OBTIDOS POR SEPARAÇÃO MECÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Ciência de Materiais.

Aprovada em: 25/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a. Nathália Bezerra de Lima (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^o Dr. José Fernando Dagnone Figueiredo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a. Maria Suely Costa da Câmara (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Aos meus filhos, Loreнна, João Guilherme e Laura.

AGRADECIMENTOS

Ao grande criador, expresso minha gratidão pelas suas bênçãos que se fazem presentes em cada etapa desta jornada chamada VIDA! Aos meus amados pais e irmãos, que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas e me proporcionaram todo o amor e suporte necessário para chegar até aqui. Liliane, minha querida irmã, desejo retribuir todo o apoio e generosidade recebidos. Sem a presença de vocês em minha vida, nada disso seria possível. Agradeço imensamente por tudo!

A meus amados filhos, que são a minha maior inspiração e motivação para seguir em frente. Espero que vocês possam se orgulhar de mim e que este trabalho possa ser um exemplo de perseverança, dedicação e de construção de dias melhores para vocês. Amo muito vocês!

Aos professores e orientadoras, Professora Nathália Bezerra Lima e Professora Érika Marinho que me guiaram durante essa jornada, compartilhando seus conhecimentos e experiências para me ajudar a crescer como estudante e profissional. Obrigada por tanto!

A todas e a todos que fazem o programa Futuras Cientistas, idealizado pela Professora Giovanna Machado que trouxe a mim e a muitas outras mulheres a possibilidade de ver para além do “buraco da fechadura”. E sim! “o lugar de mulher é onde ela quiser”.

A minha sobrinha que tanto me acolheu em sua casa para que eu pudesse estudar, minha sempre gratidão! A meus amigos e colegas de trabalho por terem me convencido a sair de casa de vez em quando e me lembrarem que existe vida além do meu computador.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais, ao laboratório de química do Campus Caruaru e ao gentil técnico, Henrique Lira, obrigada por todo suporte! Ao Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais por formar e disponibilizar pesquisadoras tão generosas e competentes como: Hisla Cavalcante e Heliana Nascimento, bolsistas atuantes no Instituto Nacional de Tecnologia em União

e Revestimento de Materiais - INTM da Universidade Federal Pernambuco, Campus Recife-PE.

Quando nada parecer dar certo, verei o cortador de pedras martelando sua rocha por cem vezes, sem que uma única rachadura apareça. Mas na centésima primeira martelada verei a pedra se abrindo em duas partes, e eu saberei que não foi aquela que conseguiu isto, mas todas as que vieram antes.

Jacob Rus

RESUMO

As mudanças climáticas representam desafios significativos para o nosso modo de vida, consumo e produção. Entre as soluções propostas, a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis, como a energia solar, tem sido destacada. Estima-se que a capacidade instalada de energia fotovoltaica chegará a 5.000 GW até 2050. No entanto, o aumento das instalações fotovoltaicas também tem gerado preocupação com o aumento do nível de resíduos fotovoltaicos. Estudos apontam que, em 2050, haverá entre 60 e 78 milhões de toneladas desses resíduos em circulação. A reciclagem de materiais fotovoltaicos é essencial para garantir a gestão adequada desses resíduos e contribuir para a preservação do meio ambiente. A identificação e caracterização química dos materiais recuperados são fundamentais para avaliar a pureza e viabilidade para reciclagem, gerando um aumento do valor econômico associado às matérias-primas recuperáveis, o que reforçaria a transição para um modelo de economia circular. Atualmente, a caracterização e separação de resíduos fotovoltaicos ainda estão em estágio inicial, utilizando técnicas físicas, químicas e tecnologias avançadas de separação. Nesse contexto, este trabalho utilizou técnicas de Espectroscopia de Fluorescência de Raio-X e Difração de Raio-X para caracterizar materiais fotovoltaicos separados mecanicamente na indústria de reciclagem. Os resultados apontam que a caracterização química dos resíduos fotovoltaicos foi eficaz na identificação de contaminantes ambientais e materiais críticos, como semicondutores de alto valor econômico. Além disso, observou-se que o processo de separação mecânica do EVA pode atingir uma maior pureza usando técnicas de moagem para obter partículas menores. Sugere-se que seja introduzido um processo adicional de separação por densidade ou por magnetismo para alcançar maior remoção de chumbo dos materiais presentes nos resíduos, viabilizando assim uma menor contaminação do ambiente por chumbo e um posterior reaproveitamento de materiais críticos, como prata e cobre.

Palavras-chave: energias renováveis; módulos fotovoltaicos; reciclagem de materiais; composição química.

ABSTRACT

Climate change poses significant challenges for our way of life, consumption, and production. Among the proposed solutions, the transition to cleaner and more renewable energy sources, such as solar energy, has been highlighted. It is estimated that the installed capacity of photovoltaic energy will reach 5,000 GW by 2050. However, the increase in photovoltaic installations has also led to concern about the rising level of photovoltaic waste. Studies suggest that by 2050 there will be between 60 and 78 million tons of this waste in circulation. Recycling photovoltaic materials is essential to ensure the proper management of this waste and contribute to preserving the environment. The identification and chemical characterization of recovered materials are fundamental to assessing their purity and viability for recycling, generating an increase in the economic value associated with recoverable raw materials, which would reinforce the transition to a circular economy model. Currently, the characterization and separation of photovoltaic waste is still at an early stage, using physical and chemical techniques and advanced separation technologies. In this context, this work used X-Ray Fluorescence Spectroscopy and X-Ray Diffraction techniques to characterize mechanically separated photovoltaic materials in the recycling industry. The results indicate that the chemical characterization of photovoltaic waste was effective in identifying environmental contaminants and critical materials, such as semiconductors of high economic value. In addition, it was observed that the mechanical separation process of EVA can achieve greater purity by using grinding techniques to obtain smaller particles. It is suggested that an additional process of separation by density or magnetism be introduced to achieve greater removal of lead from the materials present in the waste, thus enabling less contamination of the environment by lead and subsequent reuse of critical materials such as silver and copper.

Keywords: renewable energy; photovoltaic modules; material recycling; chemical composition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Redução da emissões até 2050 através de seis vias tecnológicas.....	23
Figura 2 – Investimento global em tecnologias de transição energética, 2010-2021	24
Figura 3 – Componentes de um ambiente propício às energias renováveis descentralizadas.....	26
Figura 4 – Células solares de primeira, segunda e terceira geração.....	29
Figura 5 – Condutividade ou resistividade elétrica de um conjunto de semicondutores	30
Figura 6 – Tecnologia de funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício.....	31
Figura 7 – Denominação das estruturas fotovoltaicas.....	32
Figura 8 – Evolução até 2030 dos materiais utilizados para diferentes tecnologias de módulos FV, em porcentagem com relação à massa total do módulo.....	35
Figura 9 – Composição do painel a) Painel fotovoltaico monofacial b) Painel fotovoltaico bifacial.....	36
Figura 10 – Estrutura química do Etileno, Acetato de vinila e do Poli (etileno-co- acetato de vinila).....	38
Figura 11 – Distribuição regional da capacidade instalada total (GW) em 2020, 2030, 2050 e investimentos acumulados (trilhões de dólares) de energias renováveis para energia geração no cenário de 1,5°C entre regiões, 2021-2050.....	42
Figura 12 – Capacidade instalada fotovoltaica acumulada dos países no final de 2019, medida em percentual.....	43
Figura 13 – Emissões totais (2021) no Brasil, em Mt CO ₂ -eq.....	45
Figura 14 – Índice de políticas de bem-estar até 2030, República Democrática do Congo e Noruega.....	48
Figura 15 – Estimativa de resíduos fotovoltaicos até 2050.....	50
Figura 16 – Visão geral das projeções globais de resíduos fotovoltaicos, 2016-2050	51
Figura 17 – Taxa de falha de acordo com reclamações dos clientes.....	52
Figura 18 – Comparação dos impactos e benefícios dos painéis fotovoltaicos em	

diferentes estágios do ciclo de vida.....	57
Figura 19 – Resíduos fotovoltaicos.....	60
Figura 20 – Diferentes tipos de processos de reciclagem de energia solar fotovoltaica.....	69
Figura 21 – a) Número cumulativo de registro de patentes para reciclagem de módulos fotovoltaicos por país\região (1995-2016), b) Registro de patentes por tipo de organização para reciclagem de módulos fotovoltaicos de c-Si por país\região.....	71
Figura 22 – Equipamento industrial para reciclagem de módulos solares na China.....	72
Figura 23 – Componentes de módulos fotovoltaicos de c-Si direcionados por métodos de reciclagem.....	73
Figura 24 – Equipamento para reciclagem de painéis solares no Brasil.....	75
Figura 25 – Resíduos fotovoltaicos processados e coletados na indústria de reciclagem.....	88
Figura 26 – Processo de pesagem e trituração e peneiramento do vidro.....	89
Figura 27 – Processo de preparo do EVA para análise.....	91
Figura 28 – Amostras do EVA (antes pós-aquecimento).....	92
Figura 29 – Amostras do EVA para análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR.....	92
Figura 30 – Preparo e análise da amostra de células solares puras.....	94
Figura 31 – Preparo para análise da amostra de células solares processadas mecanicamente.....	95
Figura 32 – Amostras de Alumínio e Liga Chumbo-Estanho para análise no FRX.....	96
Figura 33 – Imagem da área analisada no vidro.....	97
Figura 34 – Espectro da Fluorescência de Raios-X do vidro.....	98
Figura 35 – Difratoograma de Raios-X do vidro- triturado.....	99
Figura 36 – Imagem das áreas analisadas no EVA.....	100
Figura 37 – Espectro da Fluorescência de Raios-X do Copolímero EVA.....	101

Figura 38 – Imagem das áreas analisadas na célula solar triturada – semicondutores.....	102
Figura 39 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da célula solar triturada – semicondutores.....	103
Figura 40 – Imagem das áreas analisadas na moldura de Alumínio.....	105
Figura 41 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da moldura de Alumínio.....	106
Figura 42 – Imagem das área analisada na Liga Chumbo-Estanho.....	107
Figura 43 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da Liga Chumbo-Estanho.....	107
Figura 44 – Difratoograma de Raios-X. a) célula solar triturada na indústria de reciclagem. b) Célula solar pura.....	110
Figura 45 – Espectro de Infravermelho do copolímero EVA em gramaturas.....	111
Figura 46 – Amostras pós-mufla.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação e descrição dos componentes presentes nos módulos de c-Si.....	37
Tabela 2 – Legislação no Brasil e no mundo sobre descarte de resíduos fotovoltaicos.....	61
Tabela 3 – Potenciais impactos ambientais no tratamento de 1000 kg de resíduos fotovoltaicos.....	64
Tabela 4 – Composição das Células de Silício Cristalino.....	79
Tabela 5 – Composição do Vidro.....	80
Tabela 6 – Configuração utilizada no software do FRX.....	96
Tabela 7 – Composição química obtida por FRX dos elementos presentes no vidro	98
Tabela 8 – Configuração utilizada no software do FRX para o EVA.....	100
Tabela 9 – Composição Química por Fluorescência de Raios-X do EVA.....	100
Tabela 10 – Configuração utilizada no software do FRX para célula solar processada industrialmente e triturada – semicondutores.....	101
Tabela 11 – Composição química por FRX da célula solar processada mecanicamente.....	102
Tabela 12 – Configuração utilizada no software do FRX para Alumínio.....	104
Tabela 13 – Composição química dos elementos presentes na moldura de alumínio	105
Tabela 14 – Configuração utilizada no software do FRX Liga Chumbo-Estanho.....	106
Tabela 15 – Composição química obtida por FRX dos elementos presentes na Liga Chumbo-Estanho.....	107
Tabela 16 – Composição química dos elementos presentes da célula solar pura	108
Tabela 17 – Bandas de absorção características dos grupos de EVA – FTIR.....	112
Tabela 18 – Resultados das amostras em gramaturas distintas.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

eV	Elétron volt.
GW	Gigawatt.
MWh	Megawatt-hora.
TWh	Terawatts-hora.
PV	Painel Fotovoltaico.
GD	Geração Distribuída.
FV	Fotovoltaica.
OIE	Oferta Interna de Energia.
MtCO ₂	Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente.
PIB	Produto Interno Bruto.
PES	Cenário de Energia Planejada.
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade.
TIR	Taxa Interna de retorno.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	Mudanças Climáticas.....	21
3.2	Transição Energética.....	23
3.3	Princípios de Funcionamento de Módulos Fotovoltaicos.....	27
3.4	Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos e Composição Química.....	33
3.5	Principais Mercados Fotovoltaicos Mundiais em Comparação com o Brasil	41
3.6	Energia Fotovoltaica e Emissões de Gases do Efeito Estufa.....	44
3.7	Geração de Resíduos Fotovoltaicos.....	49
3.8	Comparação dos Impactos e Benefícios das diferentes fases do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos.....	54
3.9	Arcabouço Legal sobre Resíduos de Painéis Solares.....	59
3.10	Riscos Ambientais e Materiais Críticos.....	63
3.11	Tecnologias de Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos: Uma Abordagem para a Gestão de Resíduos.....	66
3.12	Os Impactos Ambientais e Toxicológicos dos Resíduos de Painéis Solares Fotovoltaicos e Caracterização de seus componentes.....	77
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	87
4.1	Coleta dos materiais fotovoltaicos.....	87
4.2	Preparação Prévia dos Materiais.....	88
4.2.1	Preparação prévia do vidro fotovoltaico.....	88
4.2.2	Processo de preparo da amostra de vidro – Pesagem, trituração e peneiramento.....	88
4.2.3	Processo de preparo da amostra de vidro – Difração de Raios-X (DRX)	89
4.2.4	Processo de preparo da amostra de vidro – Fluorescência de Raio-X (FRX).....	89
4.3	Preparação prévia do polímero – EVA.....	90
4.3.1	Processo de preparo da amostra de EVA – Moagem e peneiramento.....	90

4.3.2.	Análise de perda de matéria orgânica.....	91
4.3.3.	Processo de preparo da amostra de EVA – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR.....	92
4.4	Preparação prévia das células solares.....	93
4.4.1	Processo de preparo da Célula Solar Pura.....	93
4.5	Processo de preparo dos semicondutores da Célula Solar (processada em método mecânico de separação).....	94
4.6	Processo de preparo do Alumínio e liga de Chumbo-Estanho.....	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
5.1	Resultados da análise realizada através da Fluorescência de Raios-X – FRX.....	96
5.2	Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X do EVA.....	100
5.3	Caracterização química por Fluorescência de Raios – X (FRX) dos elementos presentes na célula solar processada mecanicamente.....	102
5.4	Caracterização por Fluorescência de Raios – X (FRX) do Alumínio (Moldura).....	104
5.5.	Caracterização por Fluorescência de Raios-X na Liga Chumbo-Estanho.....	106
5.6	Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X na célula solar pura.....	108
5.7	Caracterização por Difração de Raios-X (Difratograma de Raios- X) a) célula solar triturada no processo de reciclagem b) célula solar pura.....	110
5.8	Caracterização por Espectroscopia de Infravermelho (FTIR) do Copolímero EVA em gramaturas diferentes.....	111
5.9	Resultados da perda de massa estabilidade térmica do Copolímero EVA - Mufla.....	113
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	116
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um fenômeno cada vez mais presente em nosso mundo moderno e têm consequências significativas à vida na Terra. Segundo o IPCC, as atividades humanas têm causado de forma inquestionável o aquecimento global. As emissões globais de gases de efeito estufa continuam a aumentar, com contribuições históricas e contínuas provenientes de fontes fósseis de energia, manejo inadequado do solo, desmatamentos, estilos de vida e padrões de consumo e produção lineares que afetam diferentes regiões, países e indivíduos. A desigualdade gritante no que diz respeito à contribuição para as mudanças climáticas aponta para a necessidade de soluções igualmente complexas (IPCC, 2023).

A busca por soluções através de políticas globais têm sido recorrentes e enfatizam limitar o uso indiscriminado de combustíveis fósseis, criar uma economia crescente, promover a sustentabilidade econômica, baixa emissão de carbono, aprimoramento da agricultura e combate ao desmatamento. De acordo com os estudos da IRENA, a transição energética pode impulsionar o bem-estar para níveis mais elevados do que o PIB e os benefícios do emprego em toda a economia englobando cinco dimensões: econômica, social, meio ambiente, distribuição e acesso à energia. (IRENA, 2021).

Dentre as energias renováveis, a tecnologia fotovoltaica é uma das principais fontes do mundo. A tendência de crescimento da energia solar fotovoltaica é positiva não apenas do ponto de vista ambiental, mas também econômico, uma vez que a geração distribuída de energia solar pode reduzir os custos com energia elétrica para os consumidores, além de gerar empregos e estimular o desenvolvimento tecnológico (ANNEE, 2021). Ela consiste em células solares feitas de materiais semicondutores que convertem a luz solar em energia elétrica. O fenômeno responsável por essa conversão é conhecido como efeito fotovoltaico e foi descoberto por Becquerel em 1839. (Moraes, 2013; REN21, 2021).

A composição dos painéis fotovoltaicos deve ser considerada para obter um tratamento ideal de resíduos. Os painéis fotovoltaicos podem ser divididos em categorias de tecnologia, que diferem em termos de materiais e substâncias

perigosas. A tecnologia fotovoltaica de silício cristalino é a mais antiga e domina o mercado, enquanto as tecnologias de filme fino representam 7% do mercado. A maioria das tecnologias é composta principalmente de vidro, variando de 75% a 95%, e apresenta cerca de 10% de alumínio, com exceção dos módulos CdTe. Os módulos de silício cristalino têm uma maior parcela de polímeros em relação às outras tecnologias, enquanto os módulos CIGS e CdTe apresentam outros componentes semicondutores em vez do silício. As pesquisas indicam uma tendência de reduzir o uso de materiais por unidade de potência e substância potencialmente perigosas. As projeções para 2030 mostram uma redução na quantidade de silício, alumínio e outros materiais utilizados nos módulos.(Weckend *et al.*, 2016).

A Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) estima que serão geradas entre 1,7 e 8 milhões de toneladas de resíduos de eletrônicos em 2030 e entre 60 a 78 milhões de toneladas em 2050. Além disso, os resíduos de painéis têm o potencial de exceder em 10% a quantidade total de resíduos eletrônicos gerados por outros dispositivos. A gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos exige uma nova abordagem sobre a reciclagem dos seus materiais. Considerando o longo ciclo de vida dos painéis e a presença de materiais preciosos/raros, como prata, índio, gálio e germânio, a reciclagem desses materiais pode gerar um aumento do valor econômico associado às matérias-primas recuperáveis, o que reforçaria a transição da Europa para um modelo de economia circular. (IRENA, 2021).

Existem grupos de pesquisa e inovação, bem como empresas que estão desenvolvendo processos de separação dos materiais/resíduos fotovoltaicos através de processos físicos ou mecânicos (trituração e moagem, separação por gravidade), processos químicos (extração de metais preciosos e recuperação de materiais semicondutores), tecnologias avançadas de separação (separação por flotação, separação por eletrofloculação separação térmica-laser), (Smith *et al.*, 2021). Atualmente, 50% das patentes relacionadas a tecnologia de separação de resíduos fotovoltaicos estão concentradas na China. Alemanha, Europa e EUA, embora tenham sido pioneiros na investigação dessas tecnologias possuem, juntos, metade das patentes mundiais (IEA, 2018). No Brasil, e em toda América Latina, apenas uma empresa atua no setor, utilizando método mecânico de separação de resíduos fotovoltaicos com recuperação de 95% dos materiais presentes no PV (GCL-POLY HOLDING, 2016; FISRT SOLAR, 2010; SUNR, 2023).

A reciclagem e caracterização de materiais fotovoltaicos são essenciais para assegurar que os recursos valiosos sejam recuperados e os materiais tratados adequadamente. Identificar e separar materiais valiosos, como metais preciosos e terras raras, é um dos principais desafios na reciclagem de painéis solares. A caracterização dos materiais também é crucial para avaliar a composição, pureza e viabilidade para reciclagem. Além disso, é fundamental desenvolver novas tecnologias de reciclagem e implementar políticas e regulamentações que incentivem a reciclagem de resíduos fotovoltaicos para garantir a gestão adequada desses materiais. A indústria solar tem a responsabilidade de contribuir para a preservação do meio ambiente através da adoção de práticas sustentáveis. (Borgese, *et al*, 2019; Choi & Fthenakis, 2014; Peeters & Muisener, 2017; Weckend & Hiete, 2016).

Desta forma, esse trabalho realizou o estudo e a caracterização química e dos materiais fotovoltaicos separados mecanicamente na indústria de reciclagem, através das técnicas de Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X e Difração de Raios-X, observando o nível de pureza de cada um dos componentes, bem como sua alteração estrutural após o processo de reciclagem. O que pode contribuir para uma adequada reintrodução desses materiais em diversos segmentos da indústria.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar a caracterização dos resíduos fotovoltaicos separados mecanicamente, através de processo mecânico industrial, identificando sua composição química, avaliando a pureza e identificando possíveis contaminantes que possam prejudicar o processo de reciclagem no seu encaminhamento à indústria de reuso, bem como reduzir seu impacto ambiental.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a coleta de materiais fotovoltaicos na indústria de reciclagem;
- Caracterizar os materiais presentes em painéis fotovoltaicos por meio da técnica analítica de Fluorescência de Raios-X (FRX);
- Caracterizar os materiais presentes em painéis fotovoltaicos por meio da Difração de Raios-X (DRX);
- Identificar possíveis contaminantes ambientais presentes nos resíduos fotovoltaicos;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As notáveis mudanças climáticas são um fenômeno cada vez mais presente em nosso mundo moderno e têm consequências significativas para a vida na Terra. Segundo o IPCC (2023), as atividades humanas, especialmente por meio da emissão de gases de efeito estufa, têm causado de forma inquestionável o aquecimento global. Entre 2011 e 2020, a temperatura média da superfície global aumentou em 1,1 °C em relação ao período de 1850-1900. As emissões globais de gases de efeito estufa continuam a aumentar, com contribuições históricas e contínuas provenientes do uso insustentável de energia, uso e mudança no uso da terra, estilos de vida e padrões de consumo e produção em diferentes regiões, países e indivíduos. Os cientistas acreditam que, se o modelo de consumo e produção atual continuar, a temperatura pode aumentar até 4 °C (EPE, 2022).

Entre as possíveis consequências estão maiores períodos de estiagens, diminuição das reservas de água potável, aumento do nível do mar, redução na produção de alimentos, problemas de saúde como câncer, doenças cardíacas e respiratórias (National Geographic, 2017a). A Organização Mundial de Saúde (2022), estima que a poluição atmosférica cause 4,2 milhões de mortes anuais. De acordo com um estudo recente (IPCC,2023), as famílias pertencentes aos 10% mais ricos do mundo são responsáveis por mais de 45% das emissões de gases de efeito estufa. Em contrapartida, famílias com renda mais baixa, correspondentes aos 50% mais pobres, emitem no máximo 15% desses gases. Esses números apontam para uma desigualdade gritante no que diz respeito à contribuição para as mudanças climáticas.

Desta forma, as mudanças climáticas são fenômenos complexos que exigem soluções igualmente complexas. Com isso, existem vários fatores, causas e consequências sendo discutidas na busca por soluções através de políticas globais que tiveram seu início pela primeira vez (após a Guerra Fria), em um evento dedicado à discussão do tema, entre os dias 3 e 14 de junho, no Brasil, denominado ECO 92. Foram estabelecidos alguns acordos em comum, porém, nem todos os países seguiram as metas estabelecidas. Da mesma forma, ocorreu em outros encontros

globais como o de Kyoto (1997) e em Copenhague (2009). Somente em 2016, após discussões com mais “maturidade climática” os países estabeleceram compromissos próprios para atingir a meta global de manter o aumento das temperaturas globais para bem abaixo de 2 °C e limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C, em níveis pré-industriais até 2050. Alguns pontos importantes discutidos foram: limitar o uso indiscriminado de combustíveis fósseis; criar uma economia crescente, promovendo geração de emprego; a sustentabilidade econômica; baixa emissão de carbono; aprimoramento da agricultura; e combate ao desmatamento (TV BRASILGOV, 2016). Em 2021, a IRENA (*International Renewable Energy Agency*) apresentou um caminho para 1,5°C na primeira edição do *World Energy Transitions Outlook* (WETO) em 2021. O caminho descarboniza todos os usos finais, com eletrificação e eficiência energética como principais impulsionadores, possibilitada pelas energias renováveis, hidrogênio verde e bioenergia moderna sustentável.

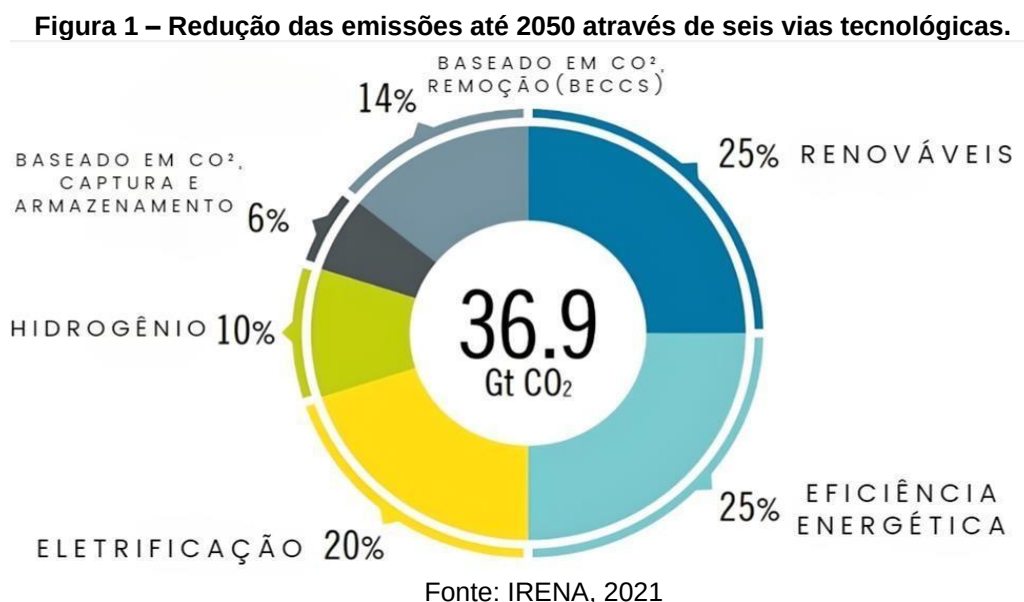
Por outro lado, o efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre quando uma parte da radiação infravermelha (percebida como calor) é emitida pela superfície terrestre e é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como consequência disso, parte do calor é irradiado de volta para a superfície, não sendo libertado para o espaço. O efeito estufa dentro de uma determinada faixa é de vital importância pois, sem ele, a vida como a conhecemos não poderia existir, uma vez que serve para manter o planeta aquecido e, assim, garantir a manutenção da vida. No entanto, as atividades humanas tem causado um desequilíbrio na emissão desses gases o que ocasiona as mudanças climáticas (IPCC, 2014).

Os gases de efeito estufa (GEE) são provenientes de queimadas naturais e vulcões, mas a maior parte das emissões provêm de atividades antropogênicas, como a geração de energia e agricultura (National Geographic, 2017a). Os GEE incluem: o Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), CFC-12 e o HCFC-22, sendo o CO₂ (CO) o mais importante, dado o impacto pelo seu volume. Por conta da participação do CO₂ no efeito estufa, estes são quantificados em CO Equivalente, “CO eq” ou Carbono Equivalente (Babarinde e Adio, 2020). Eles, ainda, estão classificados de acordo com o seu potencial de impacto no aquecimento global (*Global Warming Potentials, GWP*), uma vez que cada um deles tem uma capacidade de acúmulo de calor e uma vida específica (Babarinde e Adio, 2020).

3.2 Transição Energética

Recentemente, alguns eventos, como a pandemia do COVID-19 e os conflitos armados entre Rússia e Ucrânia, acentuaram os custos à economia global de um sistema energético centralizado e dependente de combustíveis fósseis. Os cidadãos de todo o mundo se preocupam com a acessibilidade das suas contas de energia, ao mesmo tempo que o impacto das “alterações climáticas são cada vez mais evidentes, colocando entre 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas em ambientes de grande vulnerabilidade às alterações climáticas”. Tudo isso, contribui para uma necessidade latente de acelerar a transição energética global (IRENA, 2023).

Até 2050, a redução anual de 36,9 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO₂) é realizável, em comparação com um caso de referência baseado em metas e políticas planejadas (Figura 1). O cenário de 1,5 °C delineado no WETO de 2021 prevê seis vias tecnológicas de uma transição energética compatível com o cumprimento do Meta climática de Paris de 1,5 °C (IRENA, 2021a):



1. Energias renováveis: Fontes renováveis de geração de eletricidade tais como a energia solar fotovoltaica, eólica, etc., e a utilização direta de energias renováveis, como a energia solar, térmica e a biomassa.

2. **Conservação e eficiência energética:** Medidas para reduzir a procura de energia e aumentar a eficiência energética da utilização final aplicações, incluindo alterações estruturais (por exemplo, deslocalização da produção de aço com redução direta de ferro, uma mudança modal em transportes) e práticas de economia circular (*por exemplo*, alternativas materiais de cimento).

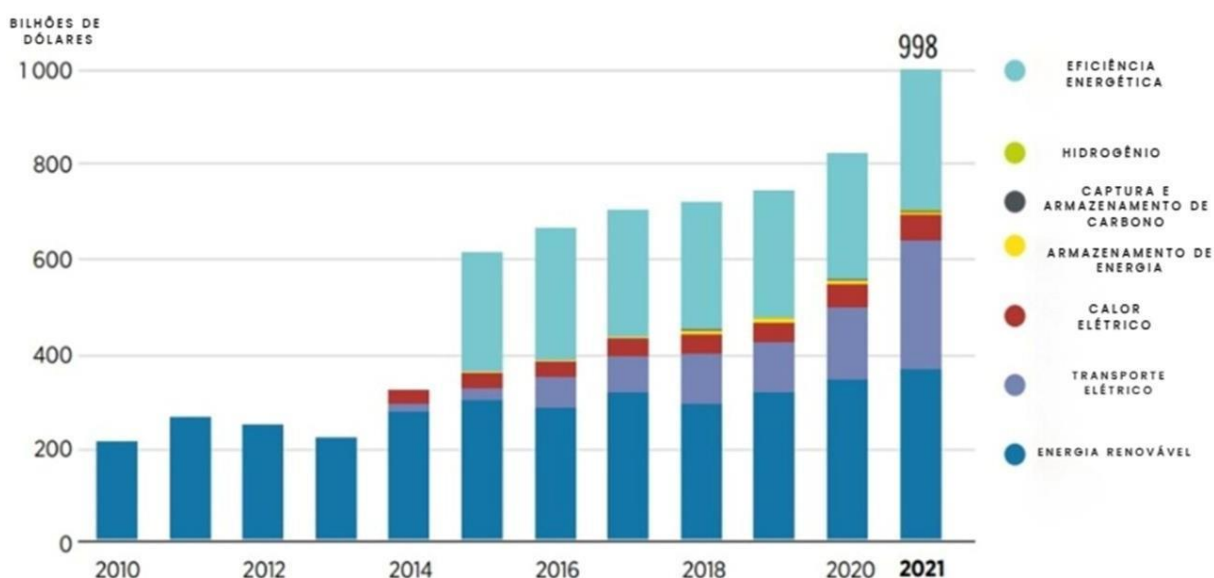
3. **Eletrificação dos setores de utilização final:** Utilização direta de eletricidade limpa em aplicações de transporte e calor.

4. **Hidrogênio e seus derivados:** Uso direto de hidrogênio limpo (predominantemente hidrogênio verde) juntamente com combustíveis sintéticos (amônia verde e metanol) e matérias-primas limpas à base de hidrogênio.

5. **Captura e armazenamento de carbono (CAC):** O carbono é capturado e armazenado a partir de combustíveis fósseis de origem pontual e outros processos emissores, principalmente na indústria.

6. **Bioenergia aliada à captura e armazenamento de carbono (BECCS) e outras medidas de remoção de carbono:** Bioenergia associada a o carbono é capturado e armazenado: em eletricidade, geração de calor e processo industrial (*por exemplo*, fornos de cimento e produtos químicos produção).

Figura 2 – Investimento global em tecnologias de transição energética, 2010-2021.



Fonte: Adaptado de BNEF, 2022b; IEA, 2021c.

Investimentos na transição energética, ver Figura 2, ainda são concentrados em poucos países e regiões, apesar do crescimento relativamente estável nos últimos anos. De acordo com dados recentes da *International Energy Agency* – IEA 2021, a região Ásia- Pacífico foi responsável por quase metade dos investimentos globais em 2021, com destaque para a China, que liderou os investimentos em todo o mundo com US\$ 251 bilhões. É importante ressaltar que esses números excluem a energia hidrelétrica e apresentam um aumento considerável de investimento em energias renováveis e transportes eletrificados. Além da China, outros países da região Ásia- Pacífico também mostraram crescimento nos investimentos em energias renováveis e calor eletrificado, como Japão e Índia. No entanto, o resto da região atraiu menos de 8% dos investimentos globais.

A Europa foi responsável por cerca de 28% dos investimentos globais, sendo que mais da metade desses investimentos foram para países, como Alemanha, Reino Unido, França e Espanha. É interessante notar que, nesses países, os investimentos no transporte elétrico foram consideráveis em 2021 e dominaram o aumento dos investimentos em comparação com 2020. As Américas atraíram quase um quinto dos investimentos globais, sendo que os Estados Unidos foram o segundo maior destino global para investimentos, com mais de US\$105 bilhões distribuídos uniformemente entre energias renováveis, transporte elétrico e calor elétrico. No entanto, o resto das Américas, incluindo toda a América Latina, representou menos de 4% dos investimentos globais. Por fim, o Oriente Médio e a África juntos não representam mais do que 2% do total de investimentos globais na transição energética. Esses números mostram que ainda há uma grande concentração de investimentos em poucos países e regiões do mundo, o que pode limitar o avanço da transição energética em outras partes do planeta. (IEA, 2021; IRENA,2023).

A pandemia de COVID-19 evidenciou a importância da energia confiável e acessível para a prestação de serviços públicos essenciais, como saúde e educação, em áreas remotas. Nesse contexto, as energias renováveis descentralizadas surgem como uma solução para garantir o fornecimento de energia elétrica e, por extensão, a resiliência dos meios de subsistência e da prestação de serviços essenciais. De acordo com relatórios da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a ligação do fornecimento de energia elétrica com atividades geradoras de renda é fundamental

para maximizar os benefícios socioeconômicos e progredir em direção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), incluindo os relacionados com a redução da pobreza e empregos dignos (IRENA e FAO, 2021; IRENA e Fundação SELCO, 2022).

Segundo o Seminário Internacional de Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética - Opção para uma Política Energética Sustentável no Brasil (2002) e Silva (2019), as energias renováveis descentralizadas são uma alternativa mais sustentável e acessível para comunidades que não têm acesso à rede elétrica convencional. Essas soluções podem ser implementadas em pequena escala, como sistemas de energia solar fotovoltaica ou turbinas eólicas de pequeno porte, e podem ser adaptadas às necessidades específicas de cada comunidade.

A resiliência socioeconômica também é um tema central nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Segundo o IPCC, as energias renováveis descentralizadas podem apoiar a resiliência do abastecimento energético e, por extensão, dos meios de subsistência e prestação de serviços essenciais (IPCC, 2022a). Conforme apresentado na Figura 3, os componentes ou eixos propícios às energias renováveis descentralizadas são: tecnologia, política e regulamentação, desenvolvimento de capacidades, planejamento, modelos de distribuição e financiamento, ligação intersetorial, e de forma transversal uma forte integração de gênero aliada a parceria de múltiplos stakeholders (IRENA, 2023).

Figura 3 – Componentes de um ambiente propício às energias renováveis descentralizadas.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2023

Para promover o desenvolvimento de soluções de energia renovável descentralizada, diversas iniciativas globais têm sido lançadas nos últimos anos. A Global Alliance for Sustainable Energy - Aliança Global para Energia Sustentável, lançada recentemente, tem como objetivo promover o acesso universal à energia limpa e acessível até 2030. A Aliança também enfatiza a importância das ligações de utilização final do aprovisionamento energético, ou seja, a conexão entre a geração de energia renovável e as atividades que dependem dessa energia para operar. Em resumo, as energias renováveis descentralizadas são uma solução promissora para garantir o acesso à energia confiável e acessível em áreas remotas, ao mesmo tempo em que promovem a resiliência socioeconômica e contribuem para o alcance dos ODS¹¹ como um caminho viável na garantia de um futuro mais sustentável e inclusivo para todos (Aliança Global pela Energia Sustentável, 2023).

3.3 Princípios de Funcionamento de Módulos Fotovoltaicos

Segundo Carvalho e Calvete (2010), o efeito fotovoltaico é o resultado da incidência de luz em um material semicondutor, gerando pares elétrons-buracos e, conseqüentemente, produzindo corrente elétrica. Esse fenômeno possibilitou a criação das células solares, que convertem a energia solar em energia elétrica. A primeira célula solar foi desenvolvida por Charles Fritts em 1883, utilizando um semicondutor de selênio revestido por uma fina camada de ouro para formar as junções. Essa célula apresentou eficiência de apenas 1%, porém, representou um

¹ As energias renováveis estão diretamente relacionadas a várias das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial:

ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: visa garantir o acesso universal, confiável, sustentável e moderno à energia a preços acessíveis. As energias renováveis são fundamentais para alcançar essa meta.

ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima: visa tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos. As energias renováveis são uma das principais soluções para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os efeitos da mudança climática.

ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: visa construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação. As energias renováveis são uma fonte de inovação tecnológica e podem impulsionar o desenvolvimento de novas indústrias.

ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis: visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. As energias renováveis podem ser usadas para fornecer energia limpa e acessível em áreas urbanas e rurais, melhorando a qualidade de vida das comunidades. ODS 12 - Consumo e Produção Sustentáveis: visa garantir padrões sustentáveis de produção e consumo. As energias renováveis são uma forma de produzir energia de forma mais sustentável, reduzindo o impacto ambiental da produção de energia.

grande avanço para a tecnologia fotovoltaica.

Desde então, a eficiência das células solares tem aumentado significativamente, tornando-se uma fonte de energia limpa e renovável cada vez mais viável. Atualmente, existem no mercado diversos dispositivos fotovoltaicos, cada um com suas características e aplicações. As células solares são comumente classificadas como de primeira, segunda e terceira geração:

1º Geração: As mais comuns e eficientes na conversão de energia (ECE) são as células estão as células solares (SCs) de silício (Si), que lideram o mercado de energia solar com uma ECE de mais de 26,7%, com tecnologia de junção *p-n* de silício monocristalino ou multicristalino. No entanto, as várias etapas de processamento e a necessidade de elevada pureza dos cristais de silício elevam o custo energético de cada *watt* produzido.

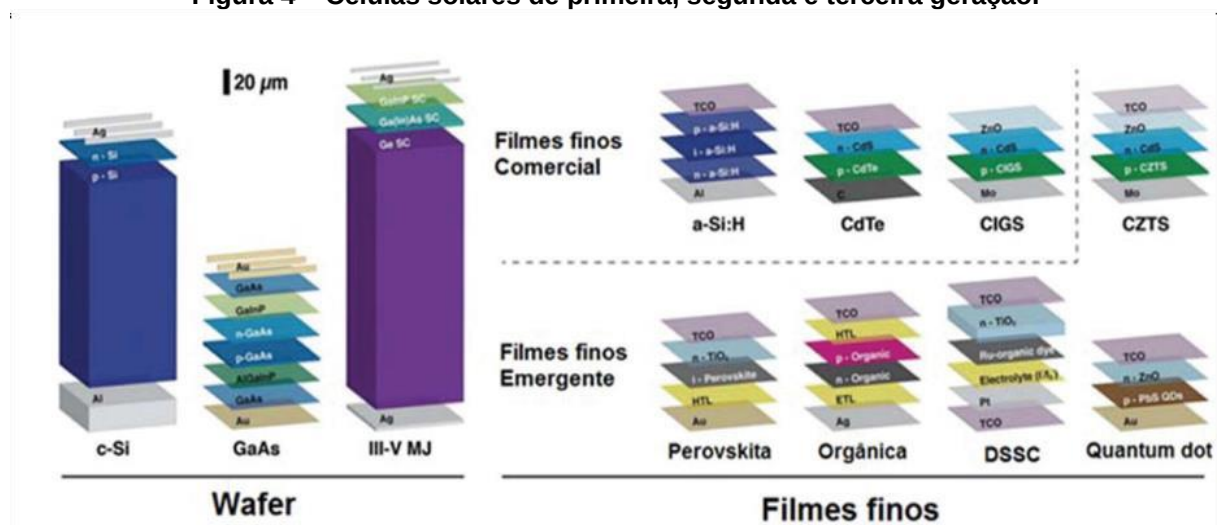
2º Geração: As células de segunda geração são baseadas em filmes finos inorgânicos depositados em um substrato condutor, necessitam de baixa energia de produção e com isso menores custos que as células de primeira geração. As SCs sensibilizadas por corante (DSSCs) são adequadas para ambientes de aplicação interna e apresentam um ECE impressionante de 13,5% quando baseadas em cobre. As células solares orgânicas (CSOs) podem atingir uma ECE superior a 19% graças à morfologia refinada da rede de dupla fibrila. No entanto, a conversão de energia é menor devido a dificuldade em preparar filmes sem defeitos. Existem vários tipos de composição, as mais eficientes são: GaAs, InP, GaInP, CIGS (Cu (In, Ga) (Se, S)₂), CdTe e CZTS (Cu, (Zn, Sn) (S, Se)₂), (Polman, 2016).

3º Geração: Segundo Ely e Swart (2016), a definição de célula solar de terceira geração pode ter definição ambígua no quesito tecnologias englobadas. Porém, há uma definição que melhor se aproxima da realidade: “são células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar do que as células baseadas em um único *bandgap*”. Existem diferentes tipos de células solares que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar do que as células baseadas em um único *bandgap*. Entre elas, destacam-se as células solares orgânicas, de pontos quânticos, tandem/multijunções, com portadores quentes, sensibilizadas por corantes e que fazem uso de tecnologias de upconversion e downconversion. Além disso, existem as

células solares híbridas, poliméricas, múltiplos fatores de cargas e uso de impurezas e, mais recentemente, as de perovskitas. Estes avanços tecnológicos têm impulsionado a eficiência e a viabilidade econômica das células solares. (Carvalho e Calvete, 2010). As células solares de perovskita (PSCs), que apresentam uma PCE superior a 25% baseadas em semicondutores compostos III-V, como as células solares baseadas em GaAs simples, têm o ECE mais alto de 29,1%, que é próximo do ECE teórico mais alto de 33,7%. Recentemente, as células solares híbridas de múltiplas junções (Si/III-V ou Ge/III-V), denominadas células solares em tandem (TSCs), têm sido amplamente investigadas. Essas células solares devem romper o limite de Shockley-Queisser e apresentam diversas combinações possíveis, como GaAs/perovskita, Si/perovskita, GaTe/perovskita, TSCs de perovskita orgânico-inorgânica e células solares de filme fino flexível (Green, 2006, 2021; Hagfeldt & Grätzel, 2000; Wang *et al*, 2015; Li G, 2012).

Os dispositivos fotovoltaicos têm aplicações em diversos setores, desde usinas de energia de grande escala até telhados domésticos e sistemas de fornecimento de energia para aeronaves e projetos espaciais. O campo de aplicação dos “*photovoltaic panel*”- PV ou Painéis Fotovoltaicos estão em constante expansão e novos avanços tecnológicos são esperados para torná-los ainda mais eficientes e acessíveis, pois possuem um potencial significativo para contribuir com a sustentabilidade energética. (NREL, 2021).

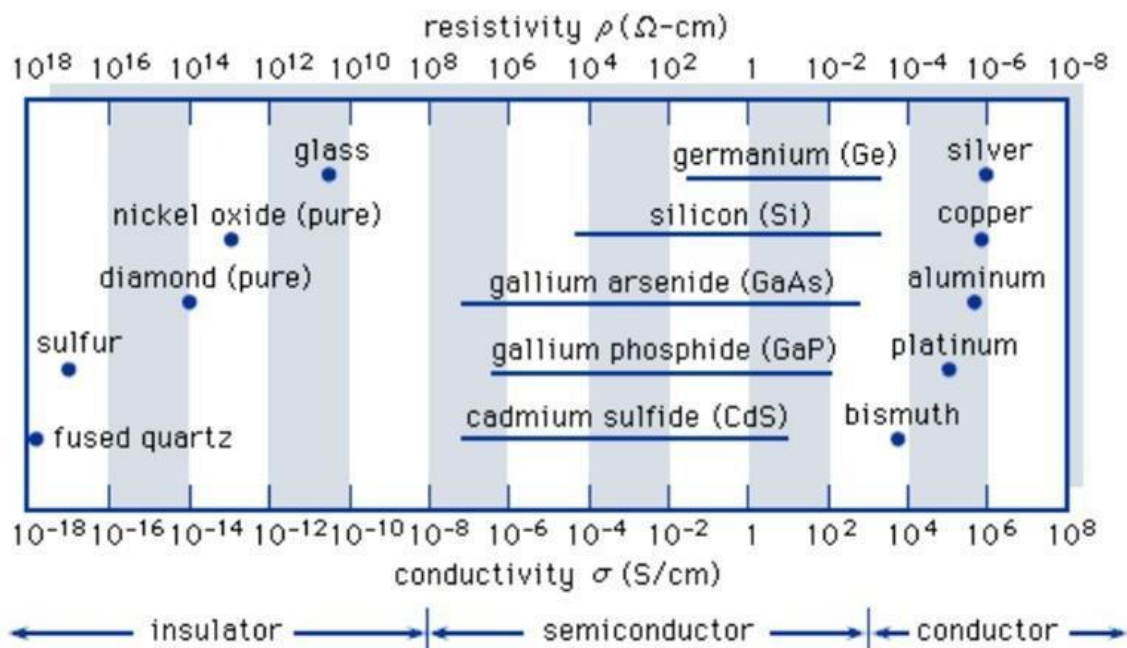
Figura 4 – Células solares de primeira, segunda e terceira geração.



Fonte: Jean, J.; Brown, P. R.; Jaff, R. L. Buonassisi, T.; Bulović, V.; Energy Environ. Sci. 2015, 8, 1200.

As células fotovoltaicas são constituídas por materiais semicondutores que geralmente são sensíveis à temperatura, iluminação, campos magnéticos e quantidades diminutas de átomos de impureza. Por exemplo, a adição de cerca de 10 átomos de boro (conhecido como dopante) por milhões de átomos de silício pode aumentar sua condutividade elétrica mil vezes. A figura demonstra ainda que isolantes como quartzo fundido e vidro, têm condutividades muito baixas, da ordem de 10^{-18} a 10^{-10} siemens por centímetro; e condutores, como o alumínio, têm altas condutividades, tipicamente de 10^4 a 10^6 por centímetro. É importante destacar que em baixas temperatura, alguns condutores, semicondutores e isolantes podem se tornar supercondutores.

Figura 5 – Condutividade ou resistividade elétrica de um conjunto de semicondutores.

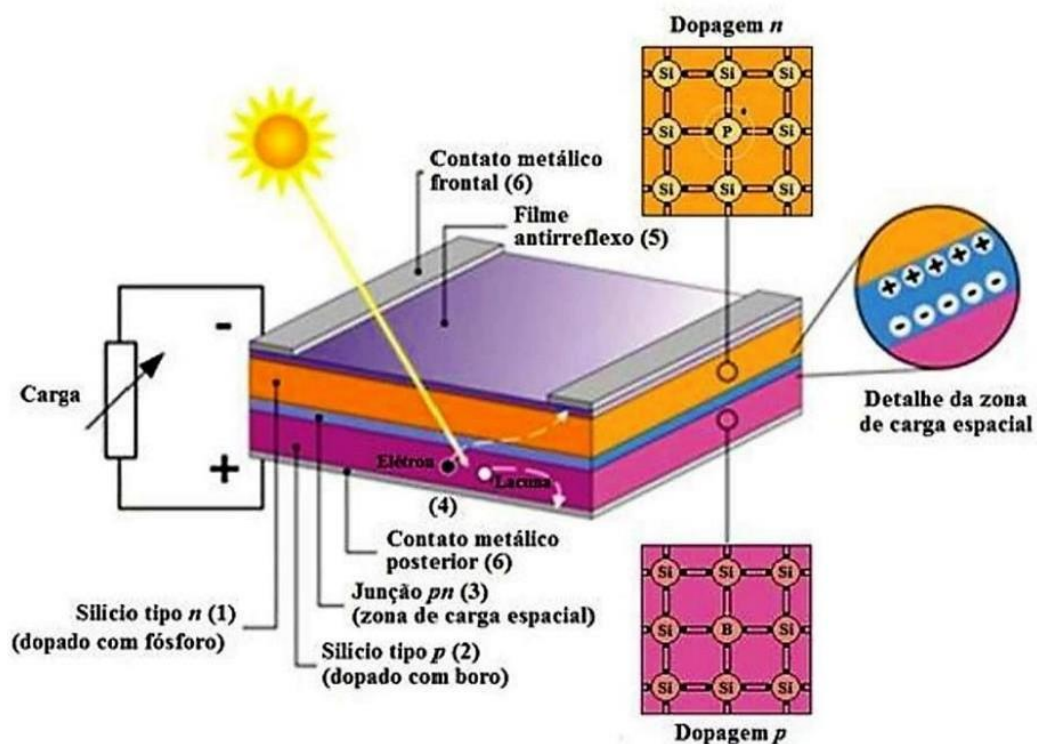


Fonte : <https://www.britannica.com/science/semiconductor#/media/1/533942/139>

Os semicondutores são basicamente pertencentes aos grupos 14 e 16 da tabela periódica, como: carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P) e Telúrio (Te). Existem compostos que apresentam comportamento semelhantes, como Arsenieto de Gálio (GaAs), Nitreto de Gálio (GaN), Telureto de Cádmio (CdTe) e Disseleneto de Cobre e Índio (CIS). A energia necessária para um elétron de valência tornar-se um elétron condutor é inferior a 3 eV. Assim, é possível que um

semicondutor tenha comportamento de um condutor fornecendo uma quantia de energia relativamente baixa, desta forma, os elétrons da banda de valência (banda mais exterior do átomo) absorve os fótons dessa radiação, as ligações covalentes são quebradas e esse elétron irá para a banda de condução (banda a qual o elétron se move livremente), passando pela banda proibida e gerando corrente elétrica. (Camargo, 2021). Ver a Figura (6):

Figura 6 – Tecnologia de funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício

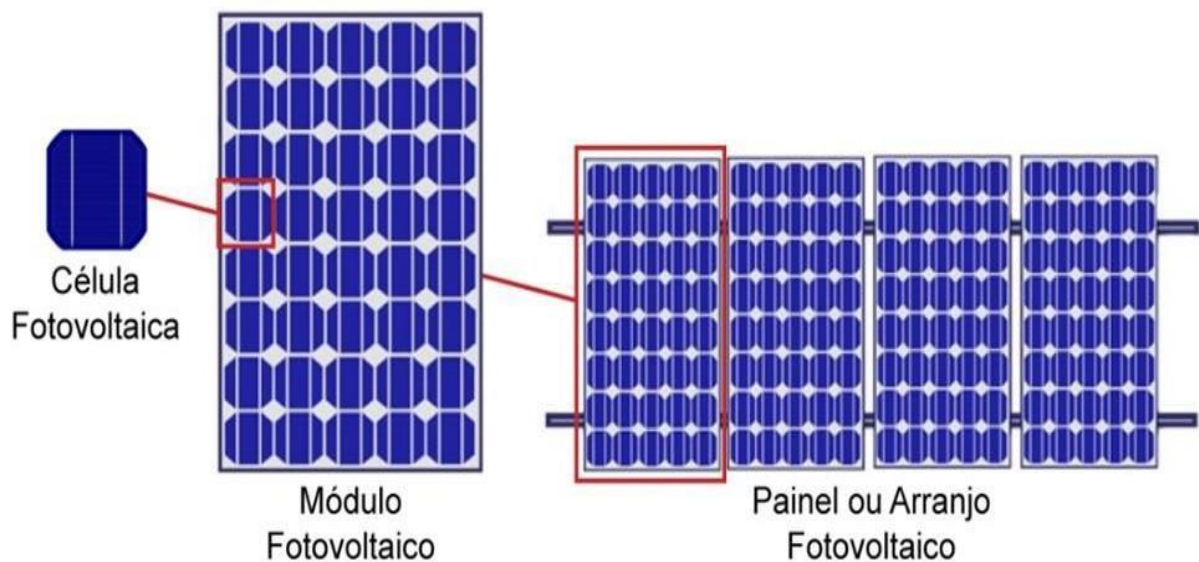


Fonte: Pinho e Galdino, 2014 – Célula fotovoltaica de silício (1) região tipo *n*; (2) região tipo *p*, (3) zona onde se formou a junção *pn* e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos ou fitas de cobre revestidas de chumbo e estanho.

Como demonstra a Figura acima (6), para constituir uma junção *pn* faz-se uso de uma “introdução controlada de impurezas no semicondutor” que é chamada de dopagem. Isso é possível, dentre outros fatores, porque os átomos de silício possuem 4 elétrons de valência, formando uma rede cristalina com átomos vizinhos. Ao introduzir um átomo pentavalente, como o Fósforo (P), Arsênio (As) ou Antimônio (Sb), com isso sua energia de ligação é muito baixa (~0,044 eV), pois há um elétron em excesso fracamente ligado ao seu átomo original. Assim, a energia térmica na temperatura ambiente é capaz de libertá-lo para a banda de condução. Por outro lado,

ao se introduzir um átomo trivalente como o Boro (B), haverá falta de um elétron para completar as ligações do átomo de silício da rede, isto é, tem-se uma lacuna ou buraco. Desta forma, com a energia térmica ambiente, um elétron do átomo vizinho pode facilmente assumir a posição da lacuna, deixando o átomo com carga negativa. Em resumo, o átomo de boro é uma impureza aceitadora ou um dopante do tipo *p*. Da mesma forma, Alumínio, Gálio e Índio também são dopantes do tipo *p*. Por fim, na célula fotovoltaica há uma malha metálica, na região (*n*) e um contato metálico na região (*p*). Havendo um contato por meio de um condutor, haverá circulação de elétrons. (Camargo *et al.*, 2021).

Figura 7 – Denominação das estruturas fotovoltaicas



Fonte: Krenzinger, 2019

A estrutura comumente utilizada para conversão de energia solar em energia elétrica segue o arranjo acima descrito na Figura 7, acima. O conjunto de células solares, formam os módulos solares, o conjunto de módulos solares formam os painéis ou arranjos e a partir de então é possível realizar a instalação com cabos de conexão, *strings*, inversores e estruturas metálicas (Krenzinger, 2019).

3.4 Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos e Composição Química

A tecnologia fotovoltaica é uma das principais fontes de energia renovável do mundo. Ela consiste em células solares feitas de materiais semicondutores que convertem a luz solar em energia elétrica. O fenômeno responsável por essa conversão é conhecido como efeito fotovoltaico e foi descoberto por Becquerel em 1839. A produção dos primeiros painéis solares ocorreu em 1955 nos laboratórios Bell, nos Estados Unidos. Inicialmente, eles foram usados principalmente em aplicações espaciais, como em satélites americanos e russos em 1958. (Moraes, 2013; REN21, 2021).

Durante as décadas de 1960 e 1970, a pesquisa se concentrou em aplicações terrestres para a tecnologia fotovoltaica, enfrentando o desafio de possíveis danos mecânicos devido ao ambiente hostil. O desenvolvimento da tecnologia de painéis solares se concentrou no uso de silício cristalino e, entre as décadas de 1980 e 2000, o investimento em aplicações terrestres para a tecnologia fotovoltaica apoiou a atividade de pesquisa e desenvolvimento. A inovação na tecnologia fotovoltaica terrestre inclui melhorias na qualidade dos materiais, tratamento de superfície e montagem de células solares, além da proteção dos painéis usando alumínio, vidro e camadas de encapsulamento. Durante o mesmo período, também foi desenvolvida a tecnologia de filmes finos. (Moraes, 2013; REN21, 2021).

O silício utilizado nos módulos c-Si precisa ser ultra puro, podendo ser utilizado o silício grau eletrônico (Si-gE) ou o silício grau solar (Si-gS). O Si-gE é preferido por sua pureza de 99,9999999%, mas o Si-gS é mais utilizado por ter um custo menor. O Si-gE é obtido a partir do silício impuro, que é o silício grau metalúrgico (Si-gM), enquanto o Si-gS é obtido por meio do processo Siemens modificado ou outras rotas alternativas. O Si-gM é obtido da sílica em fornos a arco elétrico utilizando quartzo ou areia e carvão como matéria-prima. Os módulos c-Si podem ser monocristalinos ou policristalinos, dependendo de cada célula FV é um grão único ou composto de vários grãos (Pinho & Galdino, 2014).

Atualmente as células solares convencionais de silício cristalino, denominadas de “primeira geração” e baseadas em junção pn, as quais são dominantes no mercado

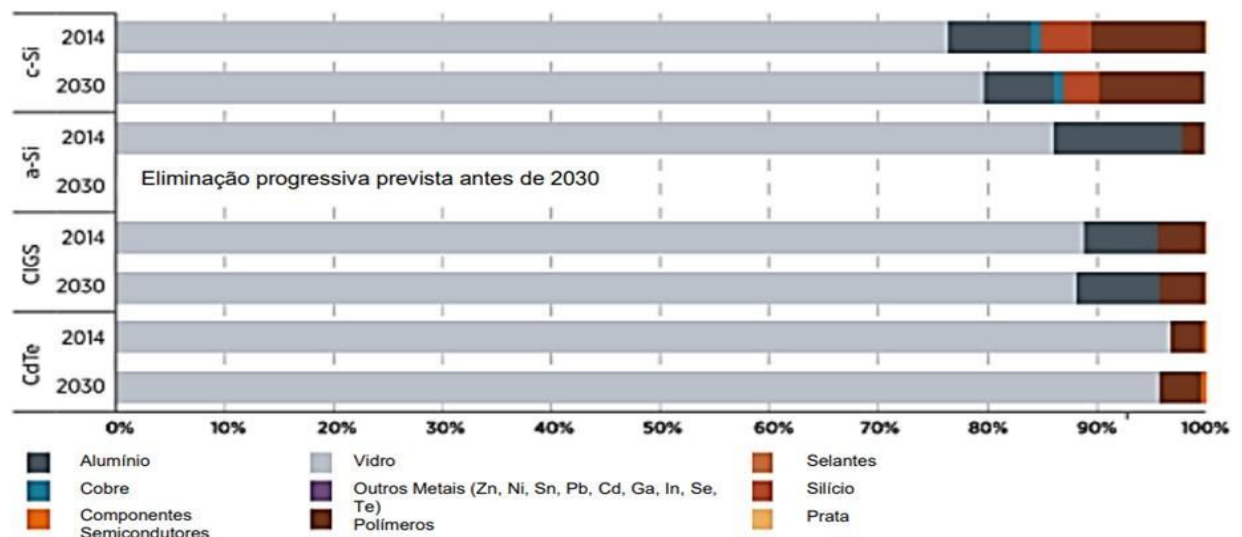
atual (95% de produção) e ainda apresentam alto custo de produção e instalação. Por essa razão serão o foco deste trabalho. As células c-Si podem ser monocristalinas (em inglês, *single-crystalline silicon* ou sc-Si) ou multicristalinas (em inglês, *multi-crystalline silicon* ou mc-Si), também chamadas de policristalinas. As células monocristalinas, compostas de wafers fabricados por um método de crescimento de cristal único, apresentam eficiências entre 20% e 24%. As de silício multicristalino, também conhecidas como policristalino, são formadas com wafers multicristalinos, fabricados a partir de um processo de solidificação por fundição e apresentam menor eficiência, algo em torno de 18% a 20% (IEA, 2014a; Masson *et al.*, 2020).

As células solares de “segunda geração”, como CIGS, CdTe e CZTS, têm custo mais baixo, mas uma eficiência mais baixa do que as células de primeira geração. A tecnologia de montagem das CS de segunda geração se constitui pela deposição de camadas finas compostas por materiais semicondutores diferentes, sucessivamente, sobre um material de suporte rígido ou flexível, como vidro ou plástico. Os materiais de filme fino mais utilizados comercialmente são telureto de cádmio (CdTe), cobre-índio- gálio-selênio (CIGS), disseleneto de cobre e índio (CIS) e silício amorfo (a-Si), (Dias, 2015; Lima, Santos, Oliveira, 2017; Masson, Simon & Gagné-Landry, 2020; Pinho & Galdino, 2014).

As células solares de terceira geração são baseadas em materiais orgânicos, corantes, pontos quânticos ou perovskitas, e incluem estruturas mais complexas como células tandem e tecnologias de *upconversion*. As células solares baseadas em perovskitas têm se tornado objeto de vários grupos de pesquisa e apresentam uma eficiência de conversão considerável. As DSSCs foram descobertas em 1887, mas só ganharam destaque em 1991, quando Gratzel e O’Regan reportaram uma célula com eficiência de 7,1%. O recorde de eficiência é de 11,9% pelo NREL, e 14% sem certificação. As DSSCs são compostas por um fotodiodo, um eletrólito e um contra eletrodo montados em um arranjo tipo sanduíche. Quando exposta à luz solar, o sensibilizador absorve os fótons incidentes, fazendo com que os elétrons passem do seu orbital molecular ocupado de maior energia para o orbital molecular desocupado de menor energia. Os elétrons excitados são injetados na banda de condução do TiO₂, sendo transportados externamente até o contra eletrodo, com isso ocorre oxidação do corante (Raphael, 2017).

A composição dos painéis PV deve ser considerada para obter um tratamento ideal de resíduos. Os PV podem ser divididos em categorias de tecnologia, que diferem em termos de materiais e substâncias perigosas. A tecnologia PV de c-Si é a mais antiga e domina o mercado. As tecnologias de PV de filme fino representam 7% do mercado. A Figura 8, apresenta informações sobre as tecnologias de módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado, incluindo a composição dos materiais utilizados em cada uma delas. A maioria das tecnologias é composta principalmente de vidro, variando de 75% a 95%, e apresenta cerca de 10% de alumínio, com exceção dos módulos CdTe. Os módulos c-Si têm uma maior parcela de polímeros em relação às outras tecnologias, enquanto os módulos CIGS e CdTe apresentam outros componentes semicondutores em vez do silício. As pesquisas indicam uma tendência de reduzir o uso de materiais por unidade de potência e substância potencialmente perigosas. As projeções para 2030 mostram uma redução na quantidade de silício, alumínio e outros materiais utilizados nos módulos. (Weckend, Hupkes & Willeke, 2016).

Figura 8 – Evolução até 2030 dos materiais utilizados para diferentes tecnologias de módulos FV, em porcentagem com relação à massa total do módulo

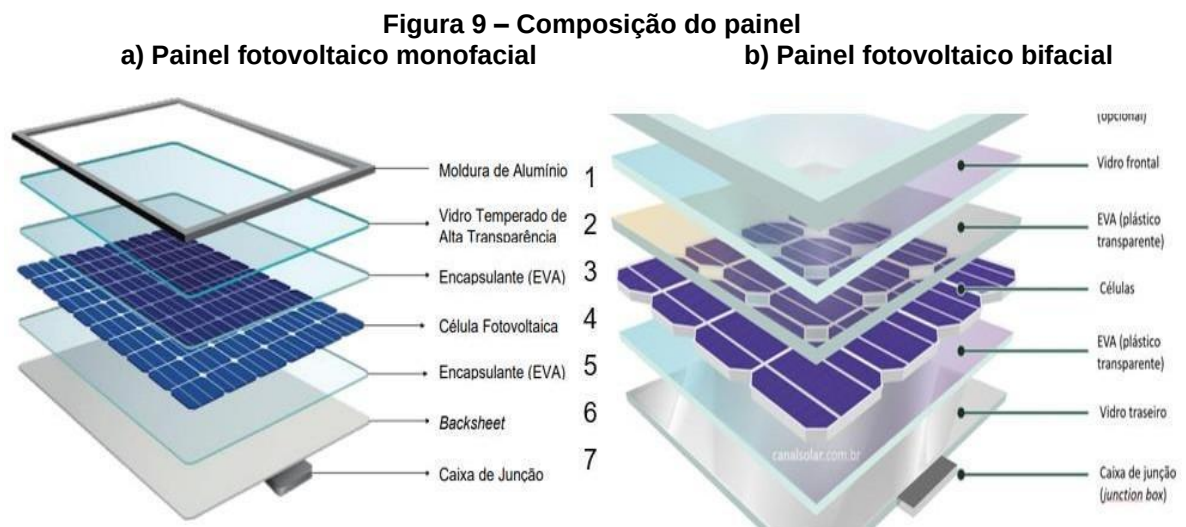


Fonte. Adaptado de Weckend *et al.*, 2016, baseado em Marini *et al.*, (2014); Pearce (2014); Raithel (2014); Bekkelund (2013); Nrel (2011) e Sander *et al.* (2007)

Embora dispositivos novos devam crescer, os produtos convencionais devem manter a dominância do mercado até 2030. A tecnologia de silício tem grande

potencial de melhoria a um custo médio. A tecnologia CIGS tem grande potencial para melhor eficiência e pode ganhar participação de mercado, enquanto do CdTe não deve crescer.

No longo prazo, outras tecnologias podem ter quase 10% de participação de mercado. As células OPV e *dye-sensitized* atingiram eficiências de 11% e 12%, respectivamente. (Irena, 2016). Do ponto de vista de proteção contra esforços mecânicos, condições adversas e agentes atmosféricos. O EVA é um material flexível, translúcido e não-refletor da radiação solar. Além disso, ele também garante o isolamento elétrico entre as células. (Carneiro, 2010; Carvalho, 2013).



Fonte: Ghizoni, (2016)

Alguns autores informam que, em massa, os módulos típicos de c-Si, contêm cerca de 76% de vidro (superfície do módulo), 10% de polímero (camadas encapsulantes e backsheet), 8% de alumínio (principalmente a moldura), 5% de silício (células solares), 1% de cobre (interconectores) e menos de 0,1 de prata (linhas de contato) e outros metais (principalmente estanho e chumbo). No entanto, os valores percentuais frequentemente variam em diferentes marcas e anos de fabricação. Comparando dados de diferentes autores, há diferenças especialmente no conteúdo metálico, ao passo que as quantidades de vidro, polímeros e molduras de alumínio são mais uniformes (Padoan *et al.*, 2019; Peeters *et al.*, 2017; Weckend *et al.*, 2016).

Tabela 1 – Identificação e descrição dos componentes presentes nos módulos de c-Si.

Identificação	Componentes	Descrição e Função do Componente
1	Moldura de alumínio	Alumínio anodizado – Confere rigidez mecânica
2	Vidro especial	Vidro temperado – Permite a entrada de luz e protege as células contra impactos mecânicos (granizo, etc)
3 e 5	Película Encapsulante-EVA	Película translúcida e não refletora da irradiação solar – O EVA garante também o isolamento elétrico das células.
4	Célula fotovoltaica	Representa o elemento que converte a luz solar em corrente elétrica.
6	<i>Backsheet</i> (fundo protetor)	Protege a parte posterior do módulo e evita também a entrada de água e outras substâncias.
7	Caixa de junção	Proteger o módulo contra corrente reversa e facilitar a saída dos cabos condutores

Fonte: Adaptado de TEIXEIRA et al., 2021

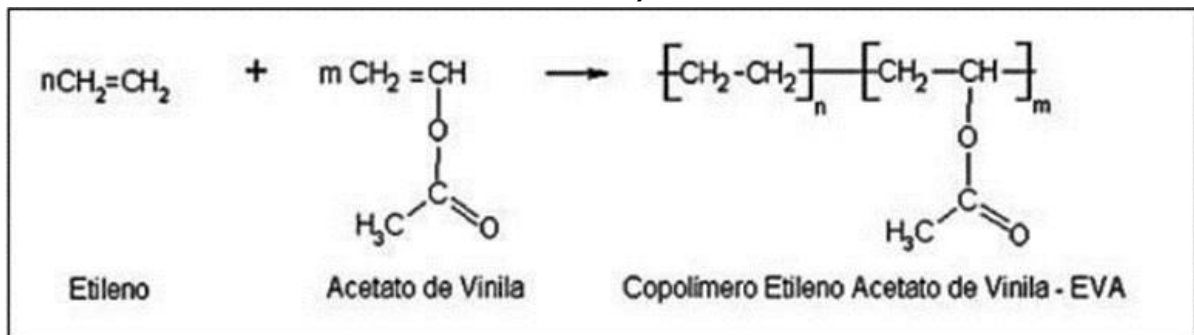
A moldura de alumínio é responsável por manter todos os componentes dos painéis solares juntos e protegidos. O vidro fotovoltaico é um componente importante dos painéis solares, pois protege as células contra impactos mecânicos e ajuda a maximizar a transmissão da luz solar para as células. No entanto, o vidro fotovoltaico também pode ser um fator que contribui para a fotodegradação das células solares ao longo do tempo (Ayele & Kim, 2020).

A composição do vidro fotovoltaico pode variar dependendo do fabricante e das especificações do projeto. Geralmente o vidro utilizado em painéis fotovoltaicos é composto por sílica (SiO_2), que é o principal componente do vidro comum, além de outros elementos como alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) (Khatib & Sopian, 2019). Estudos têm sido realizados para entender a relação entre a composição do vidro fotovoltaico e a eficiência dos painéis solares. Pesquisas mostram que a adição de elementos como cálcio e magnésio pode ajudar a melhorar a transmissão da luz para as células solares, enquanto a presença de alumínio pode reduzir a eficiência dos painéis solares devido à formação de camadas de óxidos na superfície do vidro (Ayele & Kim, 2020).

O encapsulante, geralmente feito de EVA (etileno acetato de vinila), é responsável por proteger as células solares contra esforços mecânicos, condições

adversas e agentes atmosféricos. No entanto, o encapsulante também pode ser um fator que contribui para a fotodegradação das células solares ao longo do tempo. (Wang et al., 2021). A estrutura molecular do EVA é um copolímero termoplástico, composto por unidades repetitivas de etileno e acetato de vinila. Dependendo do fabricante e das especificações do projeto, o EVA utilizado em células solares contém cerca de 30% a 40% de acetato de vinila em sua composição. (Serrano-Lujan & Martinez-Domingo, 2019).

Figura 10 – Estrutura química do Etileno, Acetato de vinila e do Poli (etileno-co-acetato de vinila).



Fonte: Medeiros, 2016

As células fotovoltaicas são os componentes principais dos painéis solares e são responsáveis por converter a energia solar em energia elétrica. As células solares são feitas de c-Si e são interconectadas eletricamente em série para formar um campo elétrico (Green et al., 2018). A composição dos elementos químicos presentes nas células fotovoltaicas, pode variar de acordo com a tecnologia empregada ou fabricante. Segundo Green et al, 2018; Shockley & Queisser, 1961; geralmente os seguintes compostos estão presentes na maioria dos módulos de silício cristalino:

- Silício (Si): é o elemento mais comum nas células fotovoltaicas, e é utilizado para absorver a luz solar e gera eletricidade;
- Cobre (Cu): é utilizado como condutor elétrico nas CF. O cobre é um bom condutor de eletricidade e é relativamente caro;
- Alumínio (Al): é utilizado como contato elétrico nas células fotovoltaicas;

- Prata (Ag): é utilizado como contato elétrico em algumas CF de alta eficiência. A prata é um excelente condutor elétrico e reflete bem a luz.

A *backsheet* é uma camada protetora que fica na parte traseira dos painéis solares e ajuda a proteger as células solares contra condições adversas. A estrutura do *backsheet* é composta normalmente de várias camadas. Estas geralmente são feitas de Tedlar/PET/Tedlar (TPT, 70% do mercado), Poliamida PET Poliamida (APA, 10% do mercado) ou ainda de Tedlar Poliamida (TPA). A camada em contato com o encapsulante deve fornecer aderência e compatibilidade química para com o mesmo, além de ser estável à exposição solar. A camada central, mais espessa, fornece propriedades mecânicas e elétricas, sendo geralmente feita de PET. Já a camada externa é responsável pela proteção ambiental e é feita de PET, PVDF ou PVF, sendo laminadas com adesivos (Omazic et al., 2019).

A caixa de junção é um componente que abriga os diodos de *bypass* e os conectores elétricos dos painéis solares. Os diodos de *bypass* são utilizados para minimizar o efeito de sombreamento parcial nas células solares, evitando que a energia gerada pelas células sombreadas seja perdida. Além disso, a caixa de junção também protege os conectores elétricos contra condições adversas, como umidade e poeira, e garante a segurança elétrica do sistema fotovoltaico.

Os painéis solares são projetados para serem duráveis e resistentes a uma variedade de fatores ambientais. No entanto, existem alguns fatores que podem danificar ou reduzir a eficiência dos painéis solares ao longo do tempo. Esses fatores podem ser divididos em quatro categorias: mecânicos, físicos, químicos e naturais. Segundo Jäger- Waldau (2017), Khatib & Mohamed (2017) e Ren *et al.* (2019), temos:

Fatores mecânicos:

- Impactos físicos: os painéis solares podem ser danificados por objetos que atingem a superfície do painel, como pedras ou galhos de árvores.
- Vibrações: vibrações excessivas podem causar danos aos componentes internos do painel solar.

- Ventos fortes: ventos fortes podem causar tensão nas conexões elétricas do painel solar, o que pode levar a danos.

Fatores físicos:

- Temperatura: temperaturas extremas, tanto altas quanto baixas, podem afetar negativamente a eficiência dos painéis solares.
- Umidade: a umidade excessiva pode corroer os componentes internos do painel solar e reduzir sua eficiência.
- Radiação: a exposição prolongada à radiação solar pode causar degradação dos materiais do painel solar, o que pode reduzir sua eficiência.

Fatores químicos:

- Poluição: a exposição a poluentes atmosféricos pode causar danos aos materiais do painel solar e reduzir sua eficiência.
- Produtos químicos: produtos químicos corrosivos podem danificar os componentes internos do painel solar.

Fatores naturais:

- Chuva e granizo: chuvas fortes ou granizo podem danificar a superfície do painel solar.
- Neve: neve acumulada pode bloquear a luz solar e reduzir a eficiência do painel solar.
- Poeira e sujeira: o acúmulo de poeira e sujeira na superfície do painel solar pode reduzir sua eficiência.

Os *hot-spots* são outro problema que pode ocorrer nos painéis fotovoltaicos. Eles são causados por sombreamento parcial das células, o que pode levar a um superaquecimento localizado e danificar as células. Os contatos metálicos, que conectam as CS em série, podem ajudar a minimizar o problema dos hot-spots. (Khatib & Sopian, 2019).

3.5 Principais Mercados Fotovoltaicos Mundiais em Comparação com o Brasil

A ampliação de todos os tipos de capacidade de geração de energia renovável é fundamental para atingir a meta de 1,5°C e reduzir os efeitos das mudanças climáticas. De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) de 2022, a Ásia, América do Norte e Europa serão responsáveis por mais de 80% das instalações até 2030. Para alcançar mais de 5.400 GW de capacidade renovável até 2030, a Ásia precisa aumentar sua capacidade em quatro vezes, enquanto a América do Norte e a Europa precisam aumentar suas instalações em cerca de cinco e três vezes, respectivamente.

Os fatores de dimensionamento para o Oriente Médio e África são ainda maiores. A eletricidade baseada em energias renováveis é a opção mais barata na maioria dessas regiões. O custo nivelado médio ponderado global da eletricidade proveniente de novos projetos de energia solar fotovoltaica (PV) em escala de serviços públicos caiu 85% entre 2010 e 2020. As reduções de custos correspondentes para concentrados energia solar (CES) foram 68%; eólica *onshore* 56%; e eólica *offshore* 48%. As tecnologias renováveis que deverão desempenhar um papel nas várias regiões são:

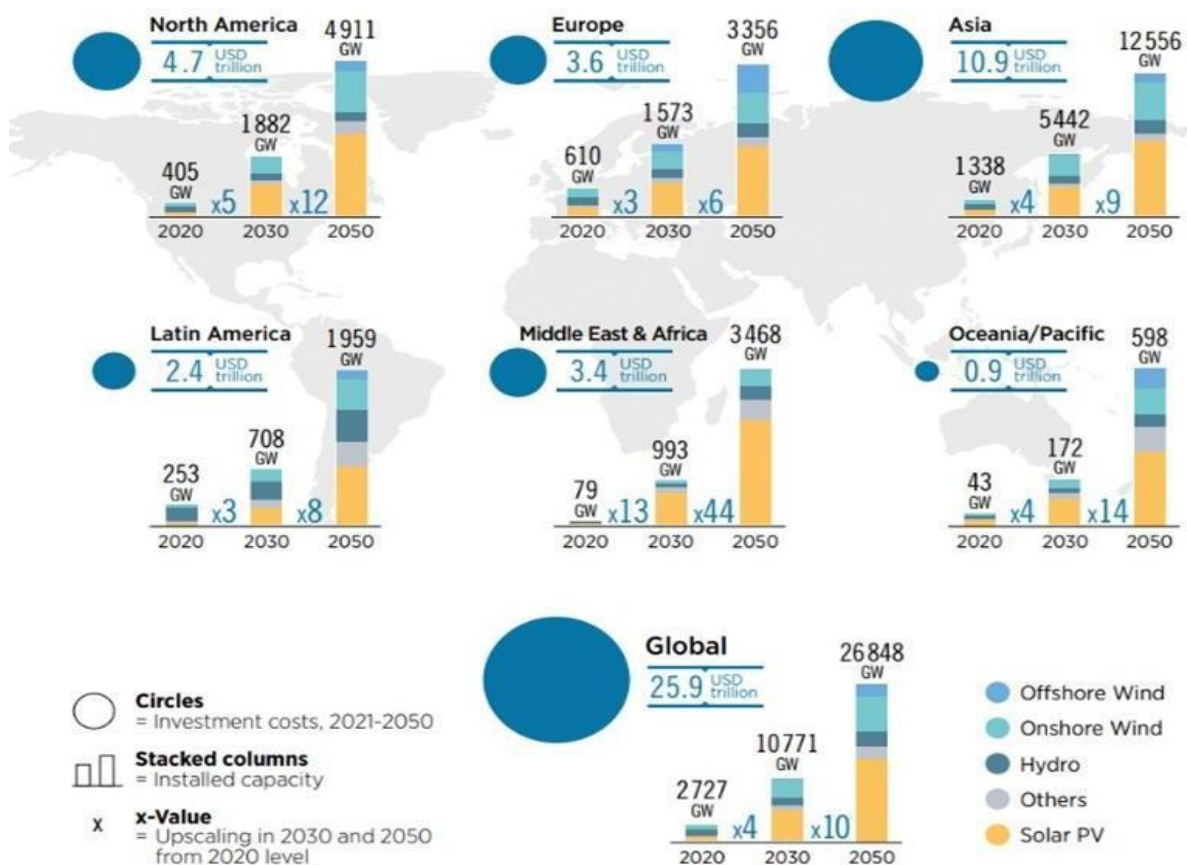
Na Ásia, a energia solar será a fonte principal de energia renovável, com a Índia liderando o caminho. A energia hidrelétrica desempenhará, também, um papel importante, especialmente na China e no Sudeste Asiático. Na América do Norte, a energia eólica *onshore* será a principal fonte de energia renovável na região, seguida pelas energias solar e hidrelétrica. Os Estados Unidos tendem a conduzir esse esforço na expansão da capacidade renovável.

Já na Europa, o modelo de energia eólica *offshore* será a principal fonte de energia renovável na região, seguida pela energia solar e pela energia hidrelétrica. A Alemanha e o Reino Unido despontam nessa expansão da capacidade renovável. No Oriente Médio, a energia solar será a principal fonte de energia renovável na região, em especial na Arábia Saudita. Entretanto, a energia eólica também desempenhará um papel importante. Por fim, na África, a energia solar será a principal fonte de energia renovável, com a África do Sul destacando-se em sua região, embora a

energia hidrelétrica também desempenhará um papel importante, especialmente na África Oriental.

Em resumo, a expansão de todos os tipos de capacidade de geração de energia renovável é fundamental para atingir as metas climáticas e reduzir os efeitos das mudanças climáticas. As tecnologias renováveis que desempenharão um papel nas várias regiões incluem energia solar, eólica e hidrelétrica. É importante que os países trabalhem juntos para aumentar a capacidade de energia renovável e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (IRENA, 2022).

Figura 11 – Distribuição regional da capacidade instalada total (GW) em 2020, 2030, 2050 e investimentos acumulados (trilhões de dólares) de energias renováveis para energia geração no cenário de 1,5°C entre regiões, 2021-2050.

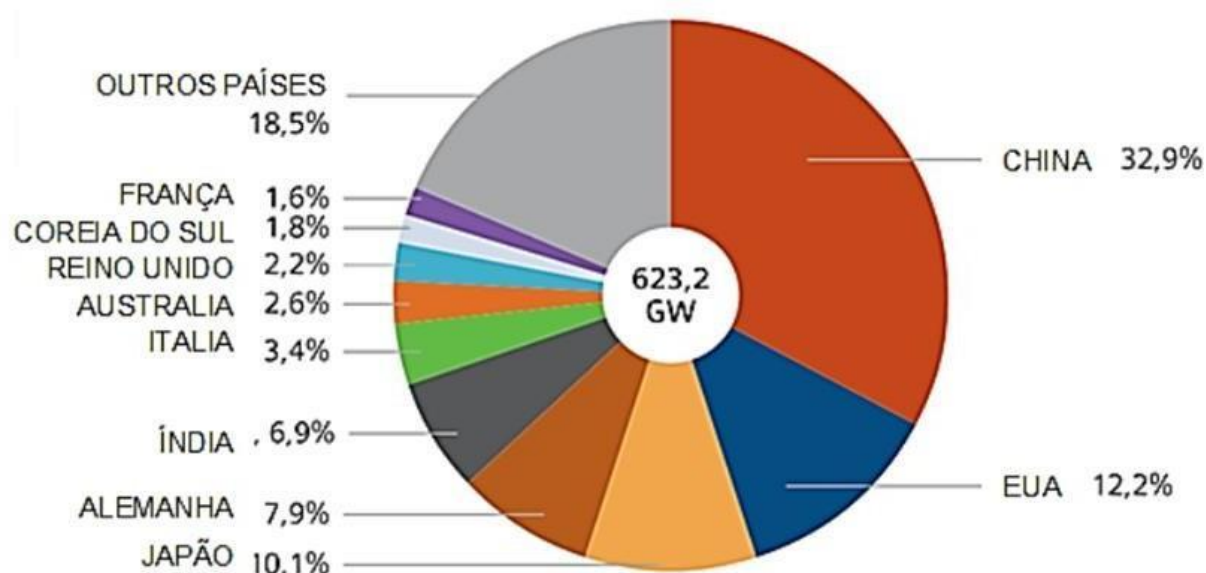


Fonte: IRENA, 2022

De acordo com Masson *et al.*, 2020, a capacidade instalada da China ficou em primeiro lugar, atingindo 205,2 GW em 2019. No ranking de países que pode ser visualizado na imagem abaixo (ver Figura 12). Os países na sequência são Estados

Unidos (75,8 GW), Japão (63,2 GW), Alemanha (49,0 GW), Índia (42,9 GW), Itália (20,9 GW), Austrália (16,3 GW), Reino Unido (13,4 GW), Coreia do Sul (11,2 GW) e França (9,93 GW). Logo após a França, está a Espanha com 9,911 GW. Atualmente o maior mercado fotovoltaico está na região Ásia-Pacífico, que produziu mais de 35,1 GW em eletricidade fotovoltaica em 2019, representando 52% das instalações globais. O crescimento verificado na China e na Índia ocorreu devido a políticas favoráveis, preços baixos de módulos fotovoltaicos e programas de eletrificação rural em larga escala. A China é líder do mercado e da indústria fotovoltaica global, com mais de 30 GW instalados em 2019, seguida pelo Japão e Austrália (Masson *et al.*, 2020).

Figura 12 – Capacidade instalada fotovoltaica acumulada dos países no final de 2019, medida em percentual.



Fonte: Adaptado de Masson *et al.*, 2020

A Europa liderou o desenvolvimento da energia fotovoltaica (FV) por cerca de uma década, com mais de 70% do mercado global até 2012. No entanto, essa liderança diminuiu devido a medidas que reduziram os incentivos e aumentaram os custos das instalações FV. A partir de 2013, a Europa não acompanhou o crescimento global da FV, enquanto Ásia e Américas se destacaram. Em resposta, a Europa buscou melhorar sua competitividade e estabeleceu novas políticas visando duplicar sua participação de mercado em 2019, com 15,9 GW instalados, representando 18%

do mercado global de energia solar. A capacidade cumulativa fotovoltaica na Europa chegou a 131,3 GW até o final de 2019, a segunda maior no mundo. É importante notar que a União Europeia e outros países europeus têm diferentes regulamentações energéticas. (Masson *et al.*, 2020).

As Américas tinham a terceira maior capacidade total acumulada em 2019 com 101,1 GW. O México experimentou um crescimento significativo e teve uma capacidade total acumulada de 5,0 GW em 2019. Após o México, o Brasil se destaca pela sua capacidade instalada. O Chile instalou 2,7 GW e é um dos mercados mais dinâmicos da região. Com um nível de irradiação recorde no norte do país, as usinas fotovoltaicas surgiram rapidamente com níveis de custos de produção recorde. A Argentina tinha 775 MW e o Peru, 284 MW de capacidade instalada acumulada no final de 2019. A energia fotovoltaica é uma fonte de energia renovável e sustentável, que tem se mostrado cada vez mais viável economicamente. Com o avanço da tecnologia e a diminuição dos custos de instalação, a tendência é que a energia fotovoltaica se torne cada vez mais presente na matriz energética mundial. No entanto, é importante que os países continuem a investir em políticas públicas que incentivem a adoção da energia fotovoltaica, tais como a criação de linhas de financiamento específicas e a implementação de incentivos fiscais. Além disso, é fundamental que haja uma maior cooperação internacional para o desenvolvimento da energia fotovoltaica, de forma a garantir uma transição energética sustentável e eficiente em todo o mundo. (Masson *et al.*, 2019, 2020).

3.6 Energia Fotovoltaica e Emissões de Gases do Efeito Estufa

As emissões antrópicas no Brasil atingiram um total de 445,4 Mt CO₂-eq (milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente) em 2021, com o setor de transportes sendo responsável pela maior parte, com 197,8 milhões de toneladas. Esses dados foram divulgados pela Agência Internacional de Energia (IEA) e mostram que cada brasileiro, produzindo e consumindo energia em 2021, emitiu em média 1,9 t CO₂-eq, o equivalente a 13% de um americano, 32% de um cidadão da União Europeia e 27% chinês. A intensidade de carbono na economia brasileira foi de 0,14

kg CO₂/US\$, segundo a IEA (2010). Em relação à intensidade de carbono na economia dos outros países, o Brasil equivale a 32% da economia chinesa, 57% da economia americana e 95% da economia da União Europeia. Para cada tep disponibilizado, o Brasil emite o equivalente a 89% das emissões da União Europeia, 65% dos EUA e 49% da China. No entanto, o setor elétrico brasileiro emitiu apenas 118,5 kg CO₂ para produzir 1 MWh, um índice muito baixo quando comparado com países da União Europeia, EUA e China (IEA,2021).

Figura 13 – Emissões totais (2021) no Brasil, em Mt CO₂-eq



Esses dados mostram que o Brasil ainda tem muito a fazer para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e contribuir para a luta contra as mudanças climáticas. O setor de transportes é um dos principais desafios, já que é responsável por quase metade das emissões do país. A adoção de veículos elétricos e a melhoria do transporte público são algumas das soluções que podem ser implementadas. Além disso, é importante que o país invista em fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. A geração de energia a partir de biomassa também pode ser uma alternativa interessante. Outra medida importante é o incentivo à eficiência energética, tanto nas residências quanto nas empresas. A adoção de tecnologias mais eficientes e a conscientização sobre o uso responsável da energia podem contribuir significativamente para a redução das emissões (IEA, 2021).

A transição energética é uma realidade cada vez mais presente no mundo, e os investimentos nessa área têm crescido constantemente. No entanto, ainda há uma

grande concentração desses investimentos em poucas regiões e países. A região Ásia- Pacífico lidera os investimentos globais em transição energética, sendo responsável por quase metade deles. A China é o principal destino de investimentos na região, com US\$251 bilhões investidos em 2021, um aumento significativo em relação aos US\$151 bilhões de 2020. Esse valor exclui a energia eficiente e grandes hidrelétricas, apresentando um aumento considerável de investimento em energias renováveis e transporte eletrificado.

O Japão e a Índia também se destacam na região, com maiores investimentos em energias renováveis e calor eletrificado. No entanto, o restante da região Ásia- Pacífico, incluindo todo o Sudeste Asiático, atraiu menos de 8% dos investimentos globais em transição energética. Isso mostra que ainda há muito espaço para crescimento e desenvolvimento nessa área em outras partes do mundo.

A Europa contabiliza cerca de 28% dos investimentos globais em transição energética, sendo que mais da metade deles foram para poucos países: Alemanha, Reino Unido, França e Espanha. É interessante notar que nesses países, os investimentos em transporte elétrico foram consideráveis em 2021 e dominaram o aumento em comparação a 2020. As Américas atraíram quase um quinto dos investimentos globais em transição energética, sendo que os Estados Unidos foram o segundo maior destino global, com mais de US\$105 bilhões investidos em renováveis, transporte elétrico e calor elétrico.

No entanto, o restante das Américas, incluindo toda a América Latina, atraiu menos de 4% dos investimentos globais. Já o Oriente Médio e a África juntos não representam mais do que 2% do total de investimentos globais em transição energética. Isso mostra que ainda há muito a ser feito nessas regiões para promover a transição energética e atrair mais investimentos nessa área. Em resumo, os investimentos em transição energética estão concentrados em poucas regiões e países, mas há um grande potencial de crescimento em outras partes do mundo. É importante que os governos e empresas invistam nessa área para promover um futuro mais sustentável e limpo para todos. (IRENA, 2022).

Em resumo, as desigualdades na capacidade de atração de investimentos entre países têm sido evidenciadas por tendências recentes, o que tem gerado

grandes desafios para a mobilização de financiamento para projetos críticos em países em desenvolvimento. Para que haja uma maior equidade na distribuição de investimentos e uma maior mobilização de financiamento para projetos críticos, é necessário que haja uma maior cooperação internacional e uma abordagem mais colaborativa entre os países. (ONU, 2021a).

A importância da cooperação internacional e do fluxo de financiamento público para a transição energética global é mais crítica do que nunca. Em 2019, os fluxos financeiros públicos internacionais destinados aos países em desenvolvimento para o apoio às energias renováveis foram de menos de US\$ 11 bilhões, o que representa menos de 3,5% do valor global investido em energias renováveis. Os principais países financiadores incluem a China, França, Alemanha e Estados Unidos, juntamente com as instituições da União Europeia, bancos multilaterais de desenvolvimento e fundos climáticos, como o Fundo de Investimento em Clima e o Fundo Verde do Clima. A maior parte desse financiamento foi destinada à África Subsaariana (cerca de 37%, ou US\$ 4 bilhões), Centro e Sul da Ásia (19%, ou US\$ 2,1 bilhões), Ásia Ocidental e Norte da África (17%, ou US\$ 1,8 bilhões) e América Latina e Caribe (14%, ou US\$ 1,5 bilhão). (ONU, 2021a).

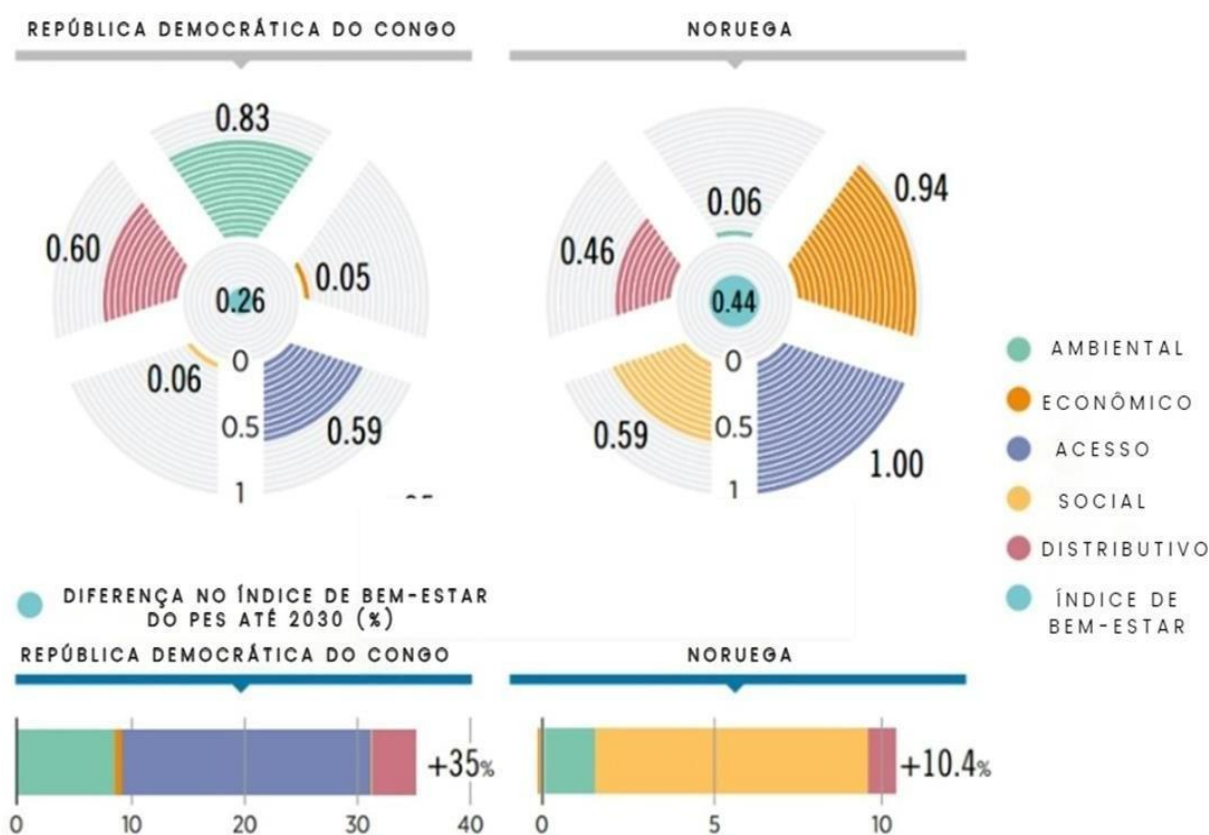
A região da Oceania atraiu a menor parcela de investimento, com apenas US\$132 milhões. Nos mercados emergentes, os fluxos financeiros internacionais continuarão a desempenhar um papel importante, como investimentos diretos em ativos de transição energética e na atração de capital privado por meio de políticas e medidas. No entanto, é necessário que haja um aumento significativo no financiamento público internacional para que seja possível alcançar uma transição energética justa e inclusiva (ONU, 2021a).

A transição energética é um tema cada vez mais relevante na agenda global, com impactos significativos na economia e no bem-estar social. Nesse sentido, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) tem desenvolvido estudos e roteiros para orientar os países nessa transição, considerando não apenas os ganhos do Produto Interno Bruto (PIB) e do emprego, mas também o bem-estar como medida holística. A pegada socioeconômica da IRENA utiliza o índice de bem-estar de transição, que engloba cinco dimensões: econômica, social, meio ambiente, distribuição e acesso à energia. De acordo com os estudos da IRENA, a transição

energética pode impulsionar o bem-estar para níveis mais elevados do que o PIB e os benefícios de emprego em toda a economia.(IRENA,2021).

Além do PIB, considera-se o *Planned Energy Scenario (PES)* - Cenário de Energia Planejada e o Cenário de 1,5°C. O *PES* é uma cesta de políticas chamada PB-0, enquanto o cenário de 1,5°C tem duas cestas de políticas: a cesta A (PB-A) e a cesta B (PB-B). A cesta PB-A adota preços de carbono mais altos e cooperação internacional limitada, enquanto a cesta PB-B apresenta preços de carbono mais baixos combinados com fluxos generosos de cooperação internacional. Preços de carbono são impostos ou taxas cobradas sobre a emissão de gases de efeito estufa, com o objetivo de incentivar a redução dessas emissões. Cooperação internacional se refere à colaboração entre países para enfrentar questões globais, como as mudanças climáticas.

Figura 14 – Índice de políticas de bem-estar até 2030, República Democrática do Congo e Noruega.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2022

No entanto, as políticas de transição energética têm impactos diferentes no índice de bem-estar. Por exemplo, a política PB-B traz melhorias na distribuição dos benefícios de transição, especialmente em regiões populosas. Em outros lugares, políticas mais granulares podem ser necessárias para enfrentar os desafios estruturais. Ao comparar os resultados de bem-estar no cenário de 1,5°C entre dois cestas de políticas, a aplicação do PB-B tem um impacto positivo para a maioria dos países, exceto Arábia Saudita, Federação Russa, China, Sul África e México. Cazaquistão, Argentina e RDC desfrutam dos maiores ganhos, impulsionados por maiores gastos sociais, políticas distributivas, maiores empregos e reforço do consumo e do investimento. Noruega, Brasil ou a Nigéria beneficiam de uma melhor distribuição ao abrigo do PB-B; Baixa intensidade de carbono e a cooperação internacional desempenha um papel, embora de forma diferente para cada país.

A estrutura do índice de bem-estar fornece insights para informar a formulação de políticas para melhorar a pegada socioeconômica da transição. Por exemplo, na RDC, o acesso está impulsionando a melhoria em relação ao *PES*, embora haja espaço para ganhos ainda maiores por meio da ação política. Já na Noruega, a dimensão social é a que mais contribui para a melhoria sobre o *PES* (IRENA, 2021; BAD, 2022).

3.7 Geração de Resíduos Fotovoltaicos

A gestão do fim de vida útil pode se tornar um componente significativo da cadeia de valor da energia fotovoltaica. Como destacado no relatório, a reciclagem de painéis solares no final de sua vida útil pode desbloquear uma grande quantidade de matérias-primas e outros componentes valiosos. Os materiais recuperados, quando reinseridos na economia, podem ser utilizados para a produção de novos painéis solares ou vendidos nos mercados globais de commodities, aumentando assim a segurança do fornecimento futuro de matérias-primas.

Estimativas preliminares sugerem que as matérias-primas tecnicamente recuperáveis dos painéis solares poderiam gerar um valor acumulado de até USD 450 milhões (em termos de 2016) até 2030. Isso equivale à quantidade de matérias-primas

atualmente necessárias para produzir aproximadamente 60 milhões de novos painéis ou 18 GW de capacidade de geração de energia. Até 2050, o valor recuperável poderá exceder cumulativamente USD 15 bilhões, conforme ilustra a Figura 15, o equivalente a 2 bilhões de painéis ou 630 GW (IRENA,2016).

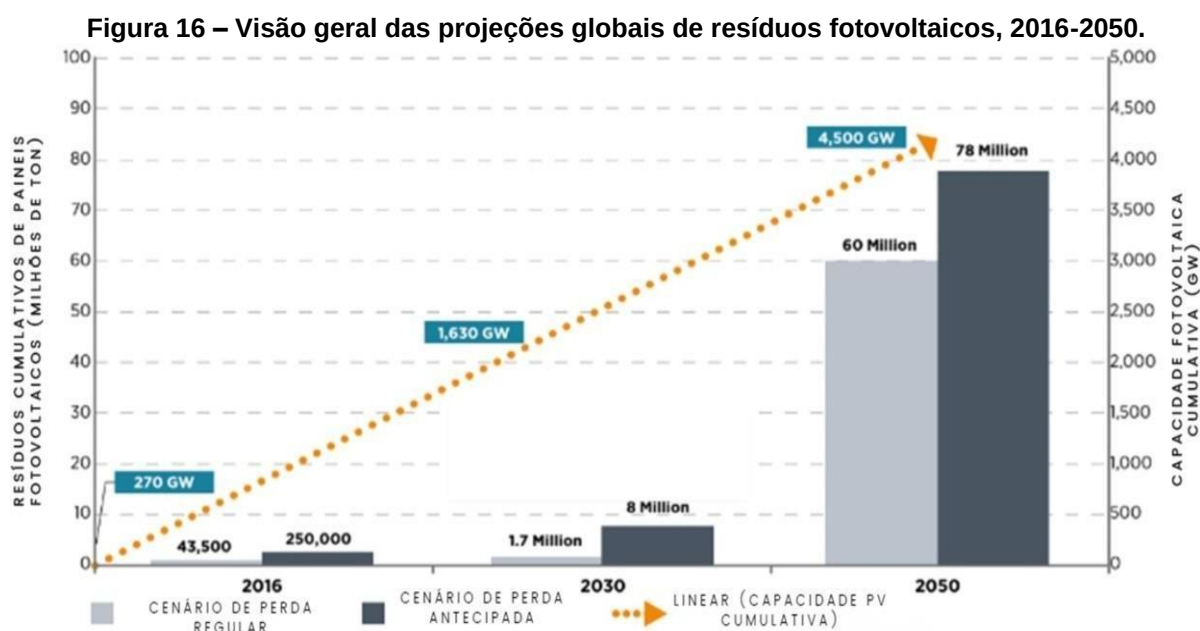
Figura 15 – Estimativa de resíduos fotovoltaicos até 2050



Fonte: IRENA, 2016

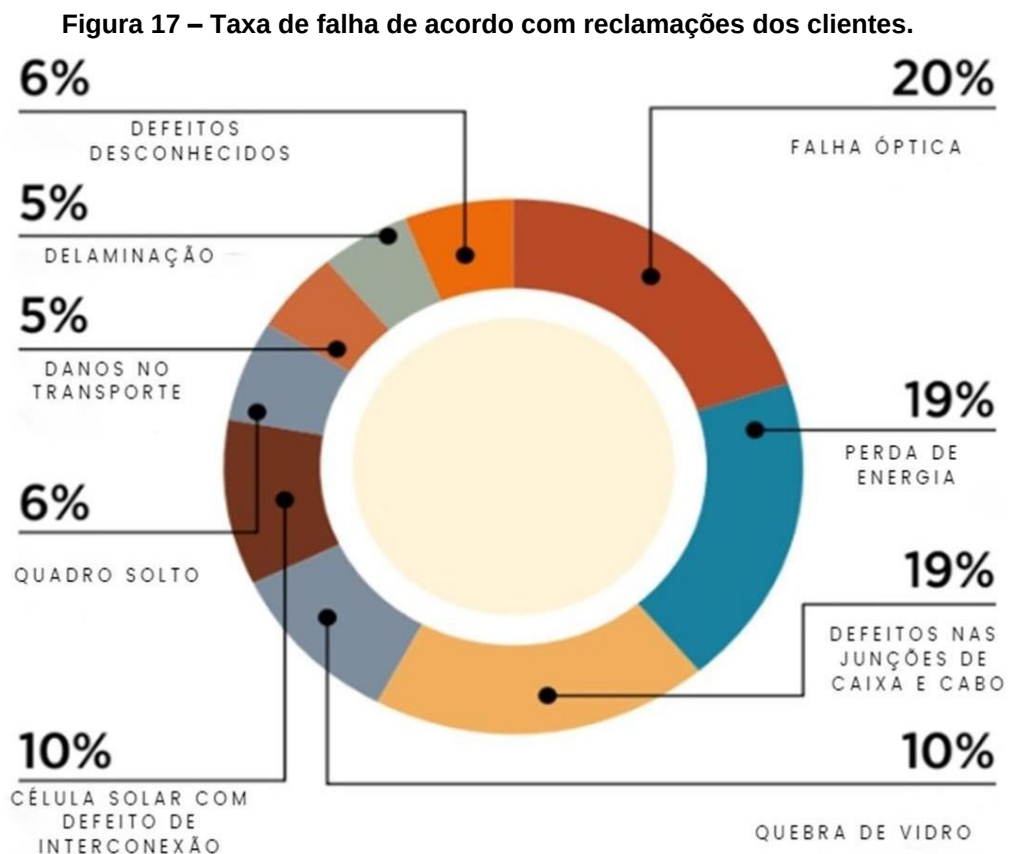
A reciclagem no final da vida útil dos painéis solares é uma medida importante para garantir a sustentabilidade da indústria fotovoltaica. Além de desbloquear uma grande quantidade de matérias-primas e componentes valiosos, a reciclagem reduz o impacto ambiental do descarte inadequado desses materiais. Com a crescente demanda por energia solar em todo o mundo, a reciclagem também pode contribuir para a segurança do fornecimento futuro de matérias-primas e para a redução dos

custos de produção. No entanto, é importante destacar que a reciclagem no final da vida útil dos painéis solares ainda é uma prática pouco difundida na indústria fotovoltaica. É necessário que haja um maior investimento em tecnologias de reciclagem e em políticas públicas que incentivem a reciclagem dos painéis solares. A criação de uma cadeia de valor para a reciclagem dos painéis solares também pode ser uma medida importante para estimular a adoção dessa prática (IRENA, 2016). Na Figura 16, as projeções globais de resíduos fotovoltaicos até 2050, nos apontam a crescente demanda.



A Figura 17 fornece uma visão geral das principais causas de falha de painéis solares fotovoltaicos (PV). As principais causas de falhas preliminares incluem degradação induzida pela luz (observada em 0,5% -5% dos casos), planejamento inadequado, trabalho de montagem incorreto e más construções de suporte. Muitas falhas infantis foram relatadas nos sistemas elétricos, como caixas de junção, caixas de cordão, controladores de carga, cabos e aterramento. As causas das falhas em meia-vida estão principalmente relacionadas à degradação do revestimento anti-reflexo do vidro, descoloração do etileno acetato de vinila, delaminação e isolamento de células rachadas.

As causas das falhas frequentemente observadas em todas as fases nos primeiros 12 anos - após a exposição a ciclos de carga mecânica (por exemplo, cargas de vento e neve) e mudanças de temperatura - incluem degradação induzida pelo potencial, falhas de contato na caixa de junção, quebra de vidro, quadros soltos, quebras de interconexão de células e defeitos em diodos. Na fase de desgaste, as falhas como as relatadas na fase de meia-vida aumentam exponencialmente além da corrosão severa de células e interconectores. Estudos anteriores com dados estatísticos sobre falhas em painéis solares fotovoltaicos observam adicionalmente que 40% dos painéis solares inspecionados sofreram pelo menos uma célula com microfissuras. Este defeito é mais comumente relatado em painéis mais novos fabricados após 2008 devido às células mais finas usadas na produção (IEA-PVPS, 2014).



Fonte: (IEA-PVPS, 2014a; Padlewski, 2014; Vodermyer, 2013 e Degraaff, 2011).

Essas falhas e probabilidade de perda, juntamente com dados da etapa de (fatores de conversão), são usados para estimar fluxos de resíduos de painéis solares

fotovoltaicos. É importante destacar que esses dados reforçam a necessidade de uma abordagem mais cuidadosa e eficaz na produção e instalação desses painéis. Investimentos em tecnologias mais avançadas e em mão-de-obra qualificada podem reduzir significativamente o número de falhas e desperdício desses materiais valiosos. Além disso, é importante considerar a reciclagem adequada desses painéis solares fotovoltaicos no final de sua vida útil. A reciclagem pode recuperar materiais valiosos e reduzir o impacto ambiental da produção desses materiais. É necessário que os fabricantes e instaladores desses painéis sejam responsáveis pela recuperação desses materiais e se esforcem para implementar práticas sustentáveis em toda a cadeia produtiva.

Em suma, as falhas em painéis solares fotovoltaicos são um problema significativo que pode levar ao desperdício de materiais valiosos e impactos ambientais negativos. É crucial que sejam tomadas medidas para reduzir essas falhas por meio do investimento em tecnologias avançadas e mão-de-obra qualificada na produção e instalação desses painéis. Além disso, é importante considerar a reciclagem adequada desses materiais no final de sua vida útil para reduzir seu impacto ambiental. A União Europeia (UE) é a única região que adotou regulamentações específicas para o descarte de painéis solares fotovoltaicos (PV). Em grande parte do mundo, esses painéis são classificados como lixo geral ou industrial, com regulamentações limitadas que incluem testes para identificar a presença de materiais perigosos e prescrições ou proibições para o transporte, tratamento, reciclagem e descarte (IEA-PVPS, 2014).

A União Europeia (UE) é pioneira na criação de regulamentações específicas para o descarte de painéis solares fotovoltaicos, estabelecendo metas de coleta, recuperação e reciclagem. Essas regulamentações são baseadas na responsabilidade estendida do produtor, exigindo que todos os fabricantes que fornecem esses painéis para o mercado da UE financiem a coleta e reciclagem no final da vida útil dos produtos. Outros países podem se inspirar na experiência da UE para desenvolver regulamentações adequadas ao seu contexto local, assegurando o descarte seguro e responsável dos painéis solares e minimizando os impactos ambientais negativos.

3.8 Comparação dos Impactos e Benefícios das diferentes fases do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos.

A reciclagem e caracterização de materiais fotovoltaicos são essenciais para assegurar que os recursos valiosos sejam recuperados e os materiais tratados adequadamente. Identificar e separar materiais valiosos, como metais preciosos e terras raras, é um dos principais desafios na reciclagem de painéis solares. A caracterização dos materiais também é crucial para avaliar a composição, pureza e viabilidade para reciclagem. Além disso, é fundamental desenvolver novas tecnologias de reciclagem e implementar políticas e regulamentações que incentivem a reciclagem de resíduos fotovoltaicos para garantir a gestão adequada desses materiais.

A indústria solar tem a responsabilidade de contribuir para a preservação do meio ambiente através da adoção de práticas sustentáveis. A reciclagem é uma das formas mais eficazes de reduzir o impacto ambiental da energia solar, além de promover a economia circular e a redução de custos na produção de novos painéis solares. É preciso investir em tecnologias e políticas que promovam a reciclagem de materiais fotovoltaicos para garantir um futuro sustentável para todos (Borgese *et al*, 2019; Choi & Fthenakis, 2014; Peeters & Muisener, 2017; Weckend & Hiete, 2016).

A coleta e reciclagem de resíduos de painéis solares tem sido muito menor do que o esperado, representando apenas 10% do potencial de volumes de resíduos. A baixa rentabilidade da reciclagem atualmente afeta negativamente o investimento na coleta e tratamento de resíduos de painéis fotovoltaicos. É importante destacar que a eficiência dos processos de reciclagem ainda mostra grandes margens para melhoria, o que representa uma oportunidade para pesquisadores. A reciclagem eficiente do lixo permite a produção de materiais brutos secundários que podem ser reintroduzidos na economia, trazendo benefícios ambientais que devem ser comparados com os impactos da fabricação e uso dos painéis (BORGESSE *et al*, 2019). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)² é uma metodologia amplamente adotada para avaliar o

² A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar os impactos ambientais de produtos, processos e serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida - desde a extração de matérias-primas até o descarte final. A ACV é baseada em normas internacionais (ISO 14040 e ISO 14044) e envolve quatro etapas principais: definição do objetivo e escopo do estudo,

desempenho ambiental de sistemas de produtos (Schneider *et al.*, 2016; Huysman *et al.*, 2015). Além disso, os métodos subjacentes de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)³ são considerados uma boa base para a triagem da eficiência de recursos (Birat, 2015; Sfez *et al.*, 2017). No entanto, apesar da ACV ter sido empregada para avaliar o desempenho ambiental de painéis solares fotovoltaicos, o destino dos resíduos fotovoltaicos tem sido amplamente negligenciado pelos pesquisadores (Gerbinet *et al.*, 2014; Sherwani *et al.*, 2010). Embora alguns aspectos do fim de vida útil dos painéis solares tenham sido discutidos, ainda há escassez de dados primários sobre a reciclagem de painéis solares. Portanto, é necessário que mais pesquisas sejam realizadas nessa área para garantir que a produção e o descarte de painéis solares sejam ambientalmente sustentáveis.

Para Latunussa *et al.* (2016) em um estudo anterior foi realizada a pesquisa de um novo processo de reciclagem de painéis solares fotovoltaicos de c-Si cristalino em fim de vida. Neste trabalho foi desenvolvida uma análise pormenorizada da reciclagem fotovoltaica, estimando seus impactos no ciclo de vida. No entanto, Latunussa *et al.* (2016) não avaliaram os benefícios potenciais em termos do ciclo de vida total. E não são estudadas medidas para melhorar a eficiência do processo de reciclagem. Wambach (2017) forneceu uma primeira revisão dos dados de inventário do ciclo de vida para reciclagem de PV, com base em 16 recicladores de todo o mundo contactados em 2015 e 2016.

Wambach (2017) também forneceu faixas de eficiências de reciclagem para diferentes materiais em diferentes processos (por exemplo, vidro 59% - 75%, metais

análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação dos resultados. Durante a análise do inventário, são coletados dados sobre o consumo de recursos e emissões de poluentes ao longo do ciclo de vida do produto, processo ou serviço. A avaliação do impacto envolve a avaliação dos efeitos ambientais desses dados. A interpretação dos resultados permite que os usuários da ACV compreendam e comuniquem os impactos ambientais associados ao produto, processo ou serviço avaliado. A ACV é uma ferramenta poderosa para apoiar a tomada de decisões sustentáveis em diferentes setores, incluindo energia renovável, construção, transporte e agricultura.

³ A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é uma das etapas da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A AICV avalia os impactos ambientais identificados durante a análise do inventário e os traduz em indicadores de impacto ambiental, que são usados para comparar diferentes produtos, processos ou serviços. Esses indicadores são geralmente agrupados em categorias de impacto, como mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, entre outras. A AICV também envolve a seleção de métodos de avaliação de impacto, que podem variar dependendo do objetivo e do escopo do estudo. A escolha do método de avaliação de impacto pode influenciar os resultados da ACV e, portanto, é importante selecionar um método que seja relevante para o contexto específico do estudo. A AICV é uma etapa importante da ACV, pois fornece informações valiosas para a tomada de decisões sustentáveis e pode ajudar a identificar áreas para melhorias ambientais em produtos, processos ou serviços.

não ferrosos 13,5% - 21,8%). O estudo concluiu que "atualmente não há estatísticas detalhadas sobre o tipo e a idade dos módulos processados em instalações de reciclagem" e que ainda há "pouco interesse em uma avaliação detalhada dos insumos para o procedimento de reciclagem, provavelmente porque tais trabalhos adicionais não são atualmente obrigatórios" (Ardente *et al*, 2019).

O primeiro exemplo de uma avaliação abrangente de recuperação de material e impactos do ciclo de vida na reciclagem de PV foi publicado há pouco tempo por Corcelli *et al.* (2018). Eles aplicaram a metodologia (ACV) à análise de duas rotas de reciclagem diferentes para painéis fotovoltaicos de silício cristalino e avaliaram os benefícios ambientais da produção de SRM. Eles baseiam a análise em testes de laboratório realizados sob condições ideais em várias amostras de PV. Corcelli *et al.* (2018) concluíram que um processo de recuperação bem projetado deve se concentrar em todos os materiais de alto valor, como silício e prata. No entanto, uma expansão em larga escala do laboratório de processos industriais é essencial para constatar os resultados.

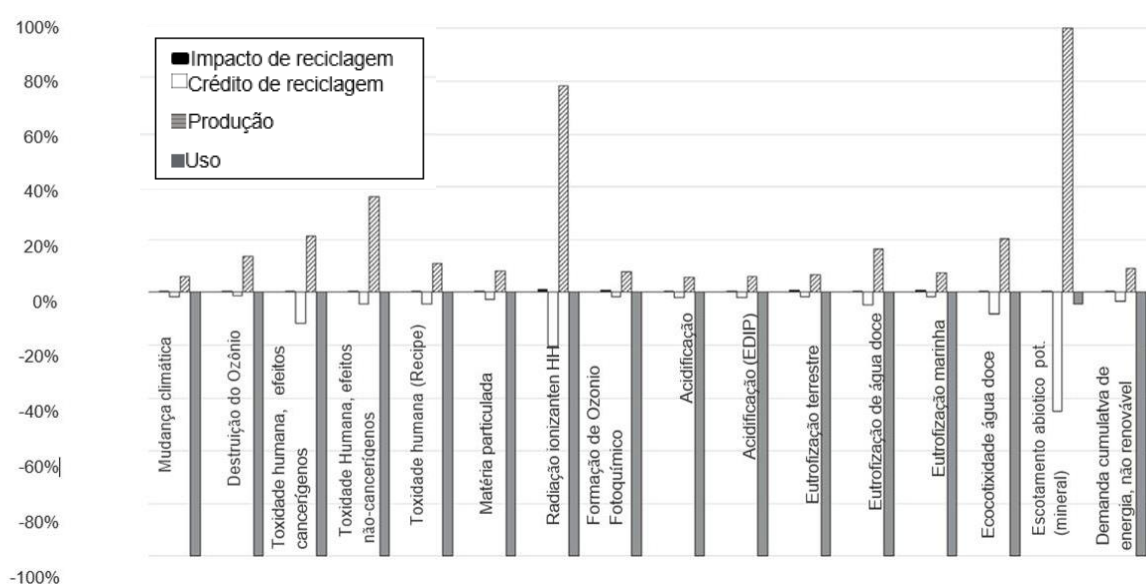
Na Figura abaixo (18), ocorre a comparação dos impactos e benefícios das diferentes fases do ciclo de vida dos painéis PV, para 1 tonelada de painéis PV. A construção da figura é baseada na atribuição do valor de 100% à fase do ciclo de vida responsável pelo maior impacto (ou benefícios) em cada categoria de impacto. Os impactos (ou benefícios) das outras fases são representados proporcionalmente. Por exemplo, em relação às mudanças climáticas, a fase de uso é responsável pelo maior benefício em termos de emissões evitadas de CO₂ eq. Os impactos da fabricação para a mesma categoria são cerca de 6%, enquanto os benefícios da reciclagem são cerca de 1%.

É importante ressaltar que os impactos da reciclagem são negligenciáveis. É importante destacar que as suposições iniciais, como localização e tempo de vida dos painéis, podem influenciar significativamente na eletricidade produzida durante a operação. Entretanto, é importante ressaltar que no trabalho em questão não houve como foco a avaliação precisa do impacto da fase de uso.

De modo geral, os benefícios da reciclagem são muito significativos para a categoria de impacto da fabricação, concedendo uma redução de mais de 40% do

impacto. Além disso, os benefícios da reciclagem também são significativos (ou seja, acima de 10%) para outras categorias de impacto, como toxicidade humana (efeitos carcinogênicos) e radiação ionizante. Os benefícios da reciclagem para outras categorias de impacto variam entre 1% e 8% daqueles para a fase de uso, enquanto os impactos da reciclagem são sempre muito baixos ou negligenciáveis (Wambach, 2017; Battisti & Corrado, 2005).

Figura 18 – Comparação dos impactos e benefícios dos painéis fotovoltaicos em diferentes estágios do ciclo de vida.



Fonte: ARDENTE et al., 2019.

Os processos de reciclagem existentes, como o PFRRS (Processo de Fusão e Refino de Resíduos de Silício), embora apresentem impactos ambientais significativos, também geram benefícios ambientais importantes, especialmente para mudanças climáticas. No entanto, a eficiência da reciclagem ainda é baixa e os benefícios da reciclagem de PV são geralmente muito baixos em comparação com os benefícios da fase de uso.

Segundo um estudo recente, há a necessidade de avaliar cuidadosamente as principais emissões do processo na fase de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a importância da rotulagem dos painéis PV para classificar os painéis sem flúor para sua reciclagem ideal (Lunard, 2018). Além disso, o estudo destaca a relevância de metas dedicadas de reciclagem para certos materiais, como metais preciosos (Prata

e Cobre), para aumentar a eficiência da reciclagem de resíduos PV.

A logística otimizada e o pré-tratamento local dos resíduos PV seguido por tratamento adicional em uma planta centralizada podem reduzir substancialmente o impacto do processo de reciclagem. A pirólise do sanduíche PV pode acarretar vários benefícios, mas somente para resíduos sem flúor. No entanto, a legislação de resíduos deve ser acoplada com considerações de design de produto para facilitar uma melhor disponibilidade de dados sobre a composição material dos painéis PV colocados no mercado. A pesquisa nesse campo deve ser incentivada para que processos eficientes e ambientalmente amigáveis de reciclagem para as tecnologias PV sejam desenvolvidos e implantados (Lunardi, 2018; Nematchoua *et al.*, 2021).

De acordo com a revisão realizada por Silva *et al.* (2019), existem diversas técnicas utilizadas na caracterização de resíduos fotovoltaicos. A análise química é uma das mais comuns, permitindo a identificação dos elementos presentes nos materiais e sua concentração. A espectroscopia também é bastante utilizada, permitindo a identificação de compostos orgânicos e inorgânicos. Além disso, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia eletrônica de transmissão (MET) são técnicas que permitem a visualização da estrutura dos materiais em escalas micro e nanométricas. Essas técnicas são essenciais para a compreensão da morfologia dos materiais e sua influência nas propriedades elétricas e ópticas.

Os resultados encontrados na revisão indicam que os resíduos fotovoltaicos são compostos principalmente por silício, vidro, alumínio e plástico. Além disso, foram identificados pequenas quantidades de metais como cobre, prata e ouro. A presença desses metais pode ser explicada pela utilização de fios condutores em algumas células solares. A análise dos resultados indica que os resíduos fotovoltaicos possuem um grande potencial para reciclagem. O silício, principal componente dos painéis solares, pode ser recuperado e utilizado na produção de novos painéis solares. Além disso, os metais presentes nos resíduos também possuem valor econômico e podem ser recuperados (Silva & Oliveira, 2019).

Nesse contexto, outro estudo, foi publicado na revista ScienceDirect Elsevier em 2023, "*Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles*" (Resíduos eletrônicos fotovoltaicos no Brasil: desafios,

potencialidades e obstáculos da economia circular), de autoria de Souza *et al.*, discute os desafios e obstáculos enfrentados pela economia circular no país, bem como o potencial de desenvolvimento de novas tecnologias e práticas sustentáveis na área.

Outro artigo *Global status of recycling waste solar panels: A review*, de autoria de Xu, *et al*, publicado no periódico Elsevier, em 2018. Destaca o uso de solventes no processo de reciclagem. Apontando, o uso de um dispositivo de condensação de reciclagem de adsorção de fibra de carbono ativado pode transformar o gás orgânico gerado em um solvente orgânico líquido de alta pureza após a reciclagem. Isso atende aos requisitos de reciclagem, reduz a descarga de poluentes na atmosfera e protege o meio ambiente.

3.9 Arcabouço Legal sobre Resíduos de Painéis Solares

A classificação de resíduos de painéis fotovoltaicos é fundamental para garantir a segurança do meio ambiente e da saúde humana durante o seu descarte e tratamento. Os princípios básicos da classificação de resíduos são aplicados na classificação de resíduos de painéis fotovoltaicos. A composição do material, suas propriedades e a mobilização de componentes e materiais para diferentes cenários de reutilização, recuperação, reciclagem e descarte são considerados. O objetivo é identificar os riscos ao meio ambiente e à saúde humana que um produto pode causar durante o seu ciclo de vida e prescrever o descarte e tratamento adequados para minimizar essas ameaças. Ver Figura 19, dos resíduos fotovoltaicos descartados em processo de lixiviação.

Figura 19 – Resíduos fotovoltaicos após descarte.



Fonte: folhavoria.com.br

Um dos riscos mais significativos é o lixiviamento dos materiais do produto em fim de vida útil ou de seus componentes para o meio ambiente. Outros riscos avaliados incluem a inflamabilidade e os riscos de exposição humana por contato com a pele ou inalação. Esses riscos podem variar de acordo com o país e a jurisdição.

As regulamentações nacionais e internacionais, como a Convenção da Basiléia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Descarte (ONU, 2016), estabelecem diversas categorias de resíduos, como resíduos inertes, não perigosos e perigosos. A origem dos resíduos também é levada em consideração, definindo subcategorias, como resíduos industriais, domésticos e específicos relacionados a produtos, como lixo eletrônico, resíduos de construção e resíduos sólidos mistos. As diferentes categorias de resíduos classificados determinam o transporte permitido e proibido, tratamento, reciclagem e vias de descarte (Prado, 2018; Yi, 2018).

No caso dos painéis fotovoltaicos, a maioria dos painéis instalados no mundo em 2015 eram painéis de c-Si, cuja massa é composta principalmente por vidro, polímero e alumínio, que podem ser classificados como resíduos não perigosos. No

entanto, os componentes menores dos painéis de c-Si podem apresentar dificuldades de reciclagem, pois contêm silício, prata e traços de elementos como estanho e chumbo. Já os painéis de filme consistem em mais de 98% de vidro, polímero e alumínio (resíduos não perigosos), mas também contêm quantidades modestas de cobre e zinco (juntos, cerca de 2% da massa), que são potencialmente perigosos para o meio ambiente.

Além disso, esses painéis também contêm materiais semicondutores ou perigosos, como índio, gálio, selênio, cádmio, telúrio e chumbo. Os materiais perigosos precisam de tratamento especial e podem se enquadrar em uma classificação específica de resíduos, dependendo da jurisdição. Por isso, é fundamental que a classificação de resíduos de painéis fotovoltaicos seja feita de forma correta e precisa, levando em consideração todos os riscos envolvidos. Isso garantirá um gerenciamento adequado dos resíduos gerados pela energia solar, contribuindo para um futuro mais sustentável e seguro para todos (ONU, 2021).

Tabela 2 – Legislação no Brasil e no mundo sobre descarte de resíduos fotovoltaicos.

PAÍS	LEI/NORMA/ REGULAMENTAÇÃO	CONTEÚDO
Brasil⁴	Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010)	Estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, prevê a logística reversa e a destinação ambientalmente adequada dos resíduos, além de incentivar a redução na geração de resíduos.
Brasil⁵	Descarte de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos Resolução CONAMA nº 401/2008	Define critérios e procedimentos para o descarte ambientalmente adequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, incluindo os módulos solares.
Brasil⁶	Gestão ambientalmente adequada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Norma ABNT NBR 16.156 2013	Estabelece os requisitos para a gestão ambientalmente adequada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, incluindo os módulos solares.
União Europeia⁷	Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (Diretiva 2012/19/UE)	Estabelece regras para a gestão ambientalmente correta de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, incluindo módulos solares, visando a prevenção de danos à saúde humana e ao meio ambiente.
Estados Unidos⁸	Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) National E-waste Law)	Regula a gestão de resíduos perigosos e não perigosos, incluindo os resíduos de módulos solares, visando a proteção da saúde pública e do meio ambiente.

Japão⁹	Lei de Promoção de Reciclagem de Produtos Elétricos e Eletrônicos	Estabelece regras para a gestão ambientalmente correta de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, incluindo módulos solares, visando a prevenção de danos à saúde humana e ao meio ambiente.
China¹⁰	Regulamentação sobre a Gestão de Resíduos Sólidos	Regula a gestão ambientalmente correta dos resíduos sólidos, incluindo os resíduos de módulos solares, visando a prevenção da poluição ambiental.
Austrália¹¹	National Television and Computer Recycling Scheme Estabelece um programa nacional para a reciclagem de produtos eletrônicos,	Estabelece um programa nacional para a reciclagem de produtos eletrônicos, incluindo módulos solares, visando a prevenção da poluição ambiental.
Índia¹²⁴	Regras de Gerenciamento de Resíduos Sólidos 2016 Regula a gestão ambientalmente correta dos resíduos sólidos, incluindo os resíduos de	Regula a gestão ambientalmente correta dos resíduos sólidos, incluindo os resíduos de módulos solares, visando a prevenção da poluição ambiental.

Fonte: Elaboração própria

Essas leis e regulamentações são importantes para garantir que os resíduos de módulos solares sejam tratados e descartados de forma segura e sustentável, minimizando os impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública. Por exemplo, o limite para concentração de lixiviado para chumbo que permite que um painel seja classificado como perigoso é de 5 miligramas por litro (mg/l) nos EUA e 0,3 mg/l no Japão. Para o cádmio, o limite perigoso é de 1 mg/l nos EUA, 0,3 mg/l no Japão e 0,1 mg/l na Alemanha.

Esses valores são importantes para garantir a segurança ambiental e a saúde pública. A classificação dos resíduos é um processo complexo que envolve a análise de diversas variáveis, como a toxicidade dos materiais presentes nos resíduos, a quantidade e a forma como são armazenados. Além disso, é importante considerar

⁴ Política Nacional de Resíduos Sólidos Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 ago. 2023.

⁵ Resolução CONAMA

⁶ ABNT - NBR 16.156

⁷ União Europeia. Diretiva 2012/19/UE

⁸ United States Environmental Protect - RCRA

⁹ Law for the Promotion of Effective Utilization of Resources.

¹⁰ Regulation on the Management of Solid Waste

¹¹ Australian Government Department

¹² Índia. Solid Waste Management Rult Rules

o destino final desses resíduos, uma vez que a disposição inadequada pode causar danos irreparáveis ao meio ambiente e à saúde pública.

Nesse sentido, é fundamental que as empresas responsáveis pela produção de painéis fotovoltaicos adotem práticas sustentáveis em sua cadeia produtiva, desde a escolha dos materiais até o descarte adequado dos resíduos gerados. Resultados de testes de lixiviação disponíveis publicamente na literatura (resumidos em Sinha e Wade, 2015) para painéis fotovoltaicos de c-Si e painéis fotovoltaicos de CdTe. Eles variam de não detectado a 0,22 mg/l para cádmio e sem detecção a 11 mg/l para chumbo. Portanto, em diferentes jurisdições, os painéis de CdTe e c-Si poderiam ser considerados resíduos não perigosos ou resíduos perigosos com base nos resultados desses testes. A adoção de tecnologias limpas e a conscientização dos trabalhadores são medidas importantes para garantir a sustentabilidade do setor.

Em suma, a classificação dos resíduos é um processo fundamental para garantir a segurança ambiental e a saúde pública. A concentração de certas substâncias em um líquido é o principal critério utilizado para determinar a classificação dos resíduos. É importante que as empresas adotem práticas sustentáveis em sua cadeia produtiva e que as jurisdições estabeleçam limites seguros para o descarte desses resíduos. Somente assim poderemos garantir um futuro mais sustentável para todos (IRENA, 2016; Prado, 2018; Yi, 2018).

3.10 Riscos Ambientais e Materiais Críticos

Segundo Latunussa *et al.* (2016), os impactos ambientais potenciais da produção de 1.000 kg de novos painéis solares c-Si são variados e podem incluir:

- Mudanças climáticas devido às emissões de gases de efeito estufa durante a produção de energia necessária para fabricar os painéis solares e durante a fabricação dos materiais utilizados nos painéis.
- Depleção do ozônio devido às emissões de gases que contêm cloro ou bromo durante a produção dos materiais utilizados nos painéis solares.

- Toxicidade humana, tanto para efeitos cancerígenos quanto não cancerígenos, devido à exposição a substâncias tóxicas durante a produção dos materiais utilizados nos painéis solares.
- Eutrofização de água doce, marinha e terrestre devido à liberação de nutrientes durante a produção dos materiais utilizados nos painéis solares.
- Acidificação do solo e da água devido à liberação de ácidos durante a produção dos materiais utilizados nos painéis solares.
- Esgotamento de recursos minerais, fósseis e renováveis devido ao uso intensivo desses recursos na produção dos materiais utilizados nos painéis solares.

A Tabela 3 mostra o impacto ambiental do tratamento de resíduos de PV por categoria de ponto intermediário relacionada à unidade funcional "1.000 kg de resíduos de PV tratados". A contribuição de cada fase no tratamento de resíduos de PV é mostrada na Tabela 3. Com base nos resultados, os processos mais impactantes são o transporte de resíduos de PV para a empresa, incineração e o processo adicional de recuperação de metais, que compreende peneiramento, lixiviação ácida, eletrólise e neutralização.

A avaliação de impacto do processo e do benefício da reciclagem de materiais é modelada no software *SimaPro* versão 8.0. O método de ponto intermediário do ILCD foi selecionado para modelar os impactos ambientais potenciais. Ele inclui as seguintes 16 categorias de impacto (Comissão Europeia, 2010):

Tabela 3 – Potenciais impactos ambientais no tratamento de 1000 kg de resíduos fotovoltaicos.

POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS		
CATEGORIA DO IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Mudanças climáticas	Kg CO ₂ eq	3.70E + 02
Destruição do ozônio	Kg CFC – 11 eq	2.34E - 05
Toxicidade humana efeitos cancerígenos	CTUh	2.83E - 05
Toxicidade humana efeitos não cancerígenos	CTUh	1.84E - 05
Matéria particulada	Kg PM _{2.5} eq	8.17E - 02

Radiação ionizante HH	Kg U235 eq	2.29E + 01
Radiação ionizante E (provisória)	CTUe	6.96E - 05
Formação de ozônio fotoquímico	Kg NMVOC eq	2.86E + 00
Acidificação	Molc H ⁺ eq	2.41E + 00
Eutrofização terrestre	Molc N eq	1.17E + 01
Eutrofização em água doce	Kg P eq	4.56E - 02
Eutrofização marinha	Kg N eq	1.05E + 00
Ecotoxicidade de água doce	CTUe	1.31E + 03
Esgotamento de recursos hídricos	.m ³ water eq	7.93E + 01
Esgotamento dos recursos abióticos - mineral	Kg Sb eq	4.32E - 03
Esgotamento abiótico (Combustível fóssil)	MJ	2.54E + 03

Fonte: ADAPTADO (UE, 2010)

A transição energética é uma realidade inegável no mundo contemporâneo. A necessidade de reduzir os impactos prejudiciais das mudanças climáticas exige uma mudança de paradigma na forma como produzimos e consumimos energia. Nesse sentido, três pilares são fundamentais: eficiência energética, geração de energia renovável e eletrificação dos setores de uso final.

Outro fator, trata-se de possível escassez de materiais críticos devido ao aumento da demanda. Materiais críticos são elementos essenciais para a produção de diversos produtos modernos, como smartphones, equipamentos médicos e tecnologias para a transição energética. Esses materiais, geralmente metais e minerais, são responsáveis por impulsionar inúmeras tecnologias, incluindo turbinas eólicas, painéis solares e baterias para veículos elétricos. No entanto, a disponibilidade desses materiais é limitada e a oferta pode ser afetada por desequilíbrios na oferta e na procura, o que resulta em flutuações de preços. A definição de quais materiais são considerados críticos ainda é objeto de debate na literatura especializada (DERA, 2021; Comissão Europeia, 2021e; IEA, 2020; CEM, 2020). A Comissão Europeia, por exemplo, lista 30 materiais como críticos (Comissão Europeia, 2020), enquanto a lista preliminar de 2021 do Serviço Geológico dos EUA de Minerais Críticos inclui 35 materiais (Registro Federal, 2021).

Entre os materiais mais importantes estão o cobre, o níquel, o lítio e os REEs (Elementos Terras Raras), especialmente o neodímio e o disprósio. O cobre é essencial na produção de linhas de energia que conectam geradores com usuários

finais. Já o lítio e o níquel são utilizados na fabricação de baterias recarregáveis. Por sua vez, o neodímio e o disprósio desempenham papéis fundamentais nos ímãs permanentes presentes em turbinas eólicas e veículos elétricos. Nenhum desses elementos pode ser facilmente substituído por alternativas. Outros materiais críticos podem se tornar mais importantes no futuro, como alumínio (usado em linhas aéreas de energia e baterias), cobalto (frequentemente utilizado em baterias de veículos elétricos), cromo, gálio, germânio, grafite (usado como anodo em baterias de íons de lítio), índio, ferro, lantânio, chumbo, manganês, molibdênio, platina, rênio, rutênio, escândio, prata, vanádio, tântalo, titânio, ítrio, zinco. Desta forma, garantir quantidades suficientes desses materiais é um desafio. A extração desses elementos é difícil e poucos países possuem depósitos desses materiais (IRENA, 2022).

3.11 Tecnologias de Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos: Uma Abordagem para a Gestão de Resíduos

A crescente demanda por energia limpa e renovável tem impulsionado o mercado de painéis fotovoltaicos em todo o mundo. No entanto, a produção em massa desses dispositivos tem gerado uma preocupação crescente com a gestão de seus resíduos. De acordo com o último relatório da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), estima-se que serão geradas entre 1,7 a 8 milhões de toneladas de resíduos de eletrônicos em 2030 e entre 60 a 78 milhões de toneladas em 2050. Além disso, os resíduos de painéis têm o potencial de exceder em 10% a quantidade total de resíduos eletrônicos gerados por outros dispositivos.

A gestão adequada dos resíduos fotovoltaicos exige uma nova abordagem sobre a reciclagem dos seus materiais. Considerando o longo ciclo de vida dos painéis e a presença de materiais preciosos/raros, como prata, índio, gálio e germânio, a reciclagem desses materiais pode gerar um aumento do valor econômico associado às matérias-primas recuperáveis, o que reforçaria a transição da Europa para um modelo de economia circular.

Segundo estudos realizados por Radziemska *et al.* (2015), processos térmicos podem ser utilizados para a remoção de componentes poliméricos e separação do

vidro, seguidos pela utilização de laser para a purificação da célula de silício. Já a purificação da superfície das células pode ser realizada por processos químicos. Outros autores, como Zeng (2017), afirmam que o processo de pirólise na etapa de separação de componentes é preferível aos processos químicos, apresentando alta eficiência em reator de leito fluidizado. De acordo com Radziemska *et al.*, (2015), o tratamento térmico é a melhor opção para separar os componentes dos módulos de silício, sendo mais rápido, simples e economicamente vantajoso.

Além disso, não gera efluentes que necessitam de tratamento. Após esse procedimento, é necessário o tratamento químico da célula de silício, com lixiviação a fim de remover as camadas anti reflexo e a camada das junções PN para que a base de silício seja reaproveitada. Kang *et al.*, 2016, estudaram a reciclagem de painéis fotovoltaicos de silício em um processo de três passos. O primeiro passo envolve a recuperação do vidro usando solventes orgânicos, seguido pela remoção da camada de adesivo por decomposição térmica, permitindo a recuperação do semicondutor juntamente com outros materiais presentes nas células do painel. Por fim, é possível obter 99,99% de silício puro através da imersão da célula recuperada em soluções contendo ácido e surfactante. (Radziemska *et al.*, 2015; Zeng, 2017; Kang *et al.*, 2016).

Atualmente, a maior parte dos esforços está concentrada em painéis do tipo c-Si, contando com três tipos de reciclagem: física(mecânica), térmica e química. O processo de reciclagem dos módulos c-Si começa com o desmantelamento manual, prossegue com a trituração do módulo para separar os seus componentes, recuperando até 80% do painel. Para os painéis não baseados em silicone, são utilizadas diversas tecnologias de reciclagem. Os painéis CdTe são esmagados primeiro, seguido de um tratamento químico que ajuda a separar os diferentes materiais semicondutores, maximizando a recuperação de 95% destes componentes. Compara-se, para os módulos fotovoltaicos de seleneto de índio de cobre (CIS) e de gálio de índio de cobre seleneto (CIGS) aplicam-se processos semelhantes (IRENA, 2016; Besiou & Van Wassenhove, 2016; Chowdhury *et al.*, 2020).

Os resíduos fotovoltaicos são compostos por diferentes materiais, incluindo silício, vidro, metais, plásticos e substâncias químicas, em sua maioria semicondutores. Essa diversidade torna desafiador o processo de separação

adequada para reciclagem e reutilização. Os processos comumente utilizados são os seguintes:

1. Processos físicos ou mecânicos de separação

- Trituração e Moagem: são métodos iniciais de separação de resíduos fotovoltaicos. Esses processos visam reduzir o tamanho dos painéis solares, facilitando etapas subsequentes de separação.
- Separação por gravidade: é amplamente utilizada para separar materiais com base em suas diferentes densidades. Esse método envolve o uso de equipamentos como peneiras vibratórias e mesas densimétricas para separar os componentes dos resíduos fotovoltaicos com base em suas características físicas.

2. Processo Químicos de separação

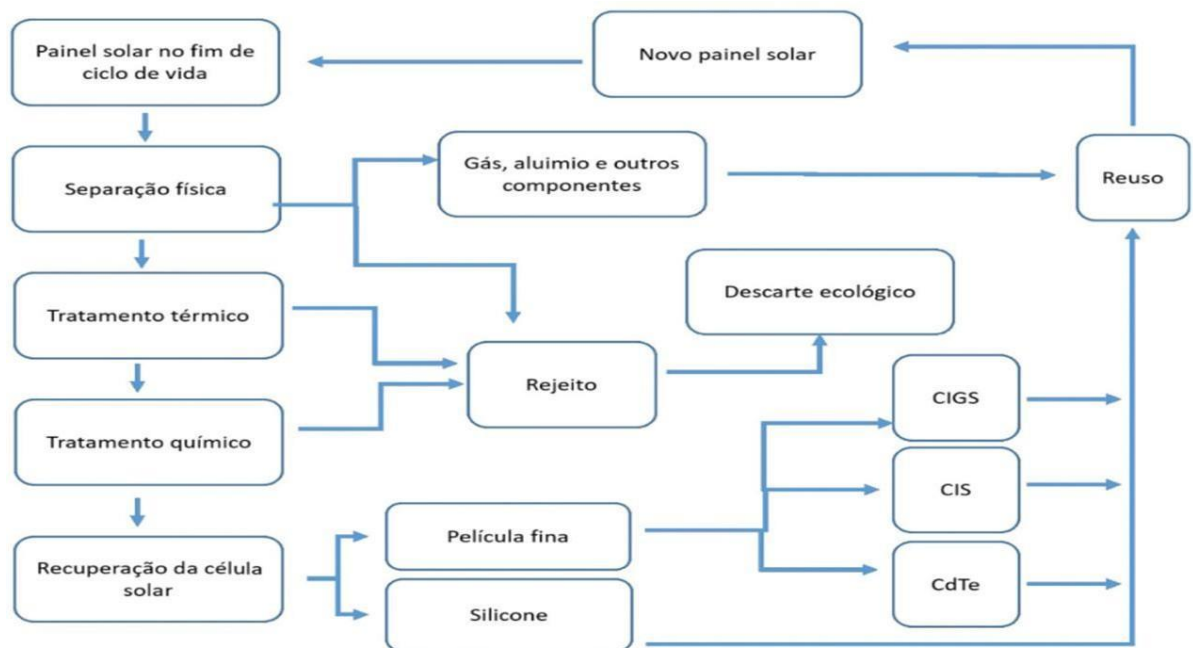
- Extração de metais preciosos: Os painéis solares contêm metais preciosos, como prata e cobre, que podem ser recuperados por meio de processos químicos. A lixiviação ácida é um exemplo de método utilizado para extrair esses metais, tornando-os disponíveis para reutilização.
- Recuperação de materiais semicondutores: O silício é um material valioso presente nos painéis fotovoltaicos. Métodos químicos, como a deposição química de vapor, podem ser empregados para recuperar e purificar o silício dos resíduos, permitindo sua reutilização na fabricação de novos painéis solares.

3. Tecnologias avançadas de separação

- Separação por flotação: é uma técnica promissora para a separação eficiente de resíduos fotovoltaicos. Nesse processo, bolhas de ar são introduzidas no meio da separação, fazendo com que certos materiais sejam separados das correntes líquidas.
- Separação por eletrofloculação: a eletrofloculação é outra tecnologia avançada que pode ser aplicada na separação de resíduos fotovoltaicos. Esse método envolve o uso de campos elétricos para

induzir a formação de flocos, facilitando a separação de partículas presentes nos resíduos. (SMITH, et al., 2021). A seguir, na Figura 20, o fluxograma dos diferentes processos de reciclagem de materiais fotovoltaicos.

Figura 20 – Diferentes tipos de processos de reciclagem de materiais fotovoltaicos



Fonte: Chowdhury et al., 2020.

Empresas e instituições de pesquisa têm se unido para desenvolver maneiras mais eficientes de reciclar PV a partir de materiais reciclados, inovando processos de reciclagem, aumentando o ciclo de vida dos componentes e gerando conhecimento colaborativo. Entre as empresas que têm trabalhado nesta área, destacam-se a *Solar World AG*, a *First Solar* e a *PV CYCLE*.”. No Brasil e a nível de América Latina destaca-se a *SunR*, empresa sediada em Vinhedo-São Paulo e que conta com uma metodologia mecânica de separação de resíduos fotovoltaicos, compactada dentro de um contêiner. Todos os materiais são destinados a indústria que realiza a incorporação dos mesmos a cadeia produtiva”. Já as instituições de pesquisa incluem a Saperatec, o Fraunhofer ISE, a *RECYCLIA* e a *Screlec*. A *AUO* também tem se destacado por aumentar o ciclo de vida dos componentes (IABS,2021). No Brasil, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul possui um grupo de pesquisa focado em

estudar as melhores metodologias de separação e destinação de resíduos fotovoltaicos, pautados no conceito de Economia Circular.

Além disso, a legislação tem acompanhado esses avanços. A União Europeia desenvolveu a diretiva WEEE, que ajuda os países individuais a adaptá-la às suas próprias legislações. Isso tem sido fundamental para incentivar a reciclagem de PV na Europa. Apesar dos avanços realizados na Europa, ainda há muito a ser feito em outros países. No entanto, é importante que haja um esforço global para desenvolver maneiras mais eficientes e sustentáveis de reciclar PV.

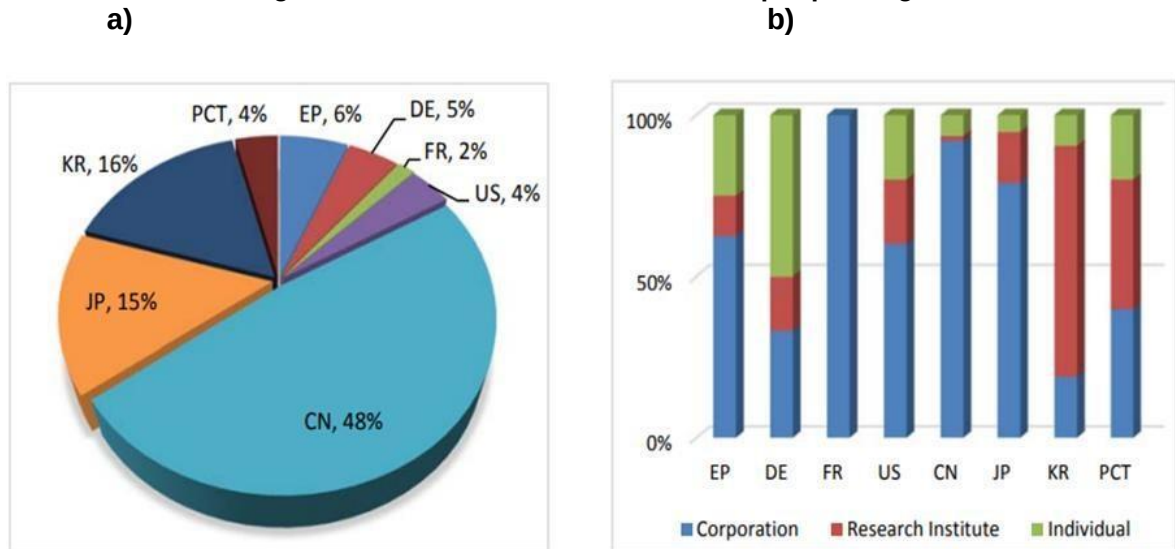
Isso pode ser alcançado por meio de parcerias entre empresas e instituições de pesquisa, bem como pelo compartilhamento de conhecimento e tecnologia. Algumas países estão desenvolvendo boas práticas e iniciativas que estão sendo implementadas em diferentes partes do globo. Na China, existe uma rigorosa legislação de gerenciamento de resíduos eletrônicos, na Suíça têm um eficiente sistema de coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos. Na Colômbia, uma empresa chamada Conceptos Plásticos transforma resíduos plásticos em tijolos para construção de casas de baixo custo. Outra empresa Chinesa Taobao lançou um programa de reciclagem de celulares que oferece aos consumidores descontos na compra de novos aparelhos.

Outra ferramenta fundamental na construção de boas práticas sustentáveis na gestão de resíduos eletrônicos é a educação. Na Coreia do Sul, por exemplo, as escolas trabalham em parceria com empresas de reciclagem para ensinar aos alunos sobre a importância da reciclagem e como fazê-la corretamente. É importante lembrar que a maioria das iniciativas se concentram em lidar com os REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos), uma vez que esses são gerados pela melhoria do sistema de coleta.

No entanto, o processo de reciclagem é um elemento-chave para sistemas de gerenciamento de resíduos eletrônicos bem-sucedidos. É necessário reduzir a geração de resíduos e gerar empresas focadas na reciclagem sustentável de REEE. Felizmente, muitas dessas iniciativas estão se espalhando pelo mundo e cada vez mais estão adotando medidas para lidar com o problema do lixo eletrônico. A gestão adequada dos resíduos eletrônicos é um desafio global que exige ação imediata e

colaboração internacional (IABS, 2021).

Figura 21 – a) Número cumulativo de registro de patentes para reciclagem de módulos fotovoltaicos por país/região (1995-2016), b) Registro de patentes por tipo de organização para reciclagem de módulos fotovoltaicos de c-Si por país/região



Fonte: IEA, 2018.

Legenda: EP: Europa (Escritório Europeu de Patentes), DE: Alemanha; US: Estados Unidos; CN: China; JP: Japão; KR: Coreia do Sul; PCT: Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (*Patent Cooperation Treaty*, em inglês)

Como a reciclagem de módulos fotovoltaicos tem se tornado uma tecnologia cada vez mais relevante na indústria fotovoltaica, o número de patentes registradas tem crescido em diferentes países. A primeira tecnologia de reciclagem de módulos FV-fotovoltaicos de c-Si (silício cristalino) foi registrada na Alemanha em 1995, nos anos seguintes esse campo não era um campo ativo de investigação. Recentemente, o número de patentes, principalmente na China cresceu devido ao crescente número de Reciclagem Fotovoltaica - RFV. Analisando os dados, de acordo com a Figura (21-a) por países/região no total de patentes efetivas analisadas, a China é responsável por quase metade dos registros de patentes. A China (CN) é seguida nos registros de patentes de tecnologia de RFV pela Coreia (KR), Japão (JP), Europa, Alemanha e EUA (US). Naturalmente, a investigação e desenvolvimento de tecnologias de RFV têm sido mais ativas nos países asiáticos nos últimos anos.

Na Figura (21-b), tem-se os tipos de organizações – empresas, institutos de investigação (incluindo universidades), e indivíduos – a maioria dos registros de

patentes na Europa, na França (FR), nos EUA, na China e no Japão foi apresentada por empresas, enquanto a maioria na Coreia foi apresentada por instituições de investigação. Um maior número de registros de patentes de empresas reflete um maior interesse comercial na tecnologia e sugere que as tecnologias estão a ser desenvolvidas para atender às necessidades do mercado. Essas informações são valiosas para entender o estado atual da tecnologia FV e suas implicações ambientais e econômicas (IEA, 2018).

Embora a China parece ter sido um retardatário no registro de patentes para tecnologia de reciclagem, o aumento acentuado do número de registros na China significa que atualmente é responsável por cerca de metade de todos (ver figura 21-a). Por outro lado, a Alemanha, a Europa e os EUA, que desenvolveram as tecnologias de RFV nos primeiros anos, parecem deter menos patentes atualmente (IEA, 2018). Na Figura 22, temos a demonstração de equipamentos industriais utilizados pela China para realizar a separação de materiais fotovoltaicos, em larga escala.

Figura 22 – Equipamento industrial para reciclagem de módulos solares na China.

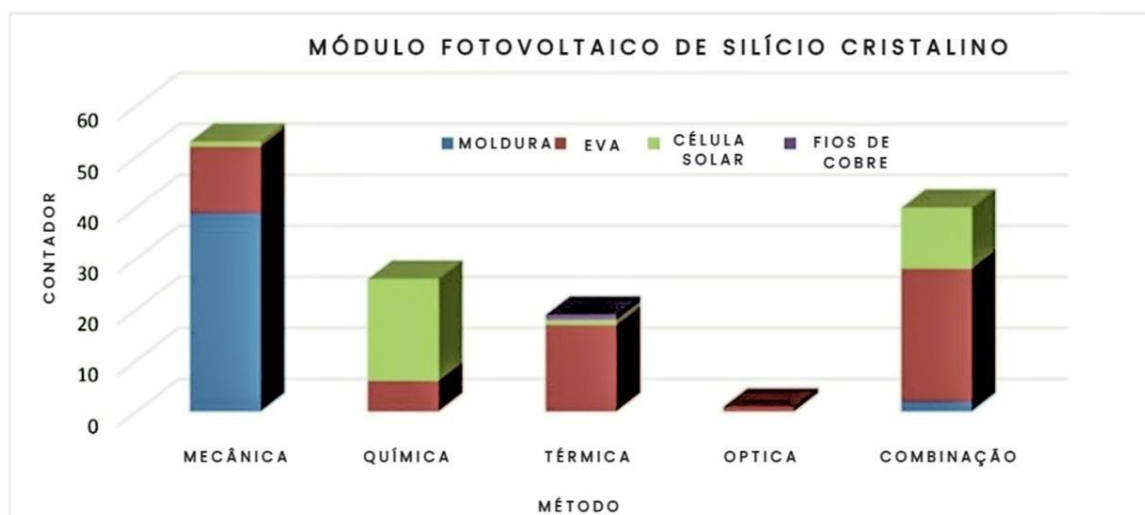


Fonte: IRENA, 2016

Na Figura 22, respectivamente, da esquerda para direita os materiais separados em escala industrial são: alumínio, vidro, cobre, silício e EVA. Nesse

equipamento acontece a retirada da moldura de alumínio, posteriormente o painel sofre moagem em partículas de 1 a 2mm. Em seguida, o material passa por um processo de pressão negativa. O moedor fino possui material de retorno, ou seja, se o tamanho da partícula não for adequado, ele será devolvido para o moedor fino. As partículas qualificadas passam pelo separador de ar, onde o pó de metal é filtrado de um lado e o outro lado contém plástico e uma pequena quantidade de metal. Esses plásticos e a pequena quantidade de metal são direcionados para o separador eletrostático, onde são novamente separados em plástico e metal puros. Esse processo faz parte da produção de painéis solares fotovoltaicos após a trituração, triagem e reciclagem dos materiais. (Suny Group, 2023).

Figura 23 – Componentes de módulos fotovoltaicos de c-Si direcionados por métodos de reciclagem.



Fonte: ADAPTADO (IEA, 2018)

Na Figura 23, está presente a correlação entre os tipos de materiais e o método de separação mais utilizado pelas patentes e tecnologias desenvolvidas, onde a moldura de alumínio é separada através de método mecânico. A célula solar e o EVA são separadas através da combinação de método mecânico e químico. Embora com predominância de químico para célula solar e térmico para EVA (IEA, 2018).

As patentes de reciclagem dos materiais fotovoltaicos têm se tornado um tema cada vez mais relevante na atualidade. Atualmente, existem diversas patentes de RMFV em todo o mundo. Uma das mais conhecidas é a patente da empresa alemã

GCL-Poly Energy Holdings Limited, que desenvolveu um processo de reciclagem de painéis solares que utiliza tecnologia de separação térmica e química para recuperar os materiais valiosos presentes nos PV. Outra patente interessante é a da empresa americana First Solar, que desenvolveu um processo de reciclagem que utiliza um banho químico para remover as camadas de materiais semicondutores dos PV. Esse processo permite a recuperação de até 90% dos materiais presentes nos PV. (IEA, 2018).

No Brasil, a empresa SunR, Figura 24, é uma das pioneiras na RMFV. A empresa utiliza um processo de reciclagem mecânica que permite a separação dos materiais presentes nos painéis solares sem a utilização de produtos químicos. Esse processo permite a recuperação de até 95% dos materiais presentes nos PV, com a possibilidade transferir o equipamento até a usinas solares, de forma a facilitar a logística reversa com tecnologia inserida em contêiner oportunizando uma maior capilaridade da tecnologia. Além das empresas citadas, diversas outras empresas e instituições de pesquisa têm investido em processos de RMFV. Esses processos são essenciais para garantir a sustentabilidade da produção de energia solar e reduzir os impactos ambientais causados pela produção e descarte inadequado dos PV (GCL-Poly Holding, 2016; First Solar, 2010; SUNR, 2023).

Figura 24 – Equipamento para reciclagem de painéis solares no Brasil



Fonte: NeoFeed, 2023. Empresa brasileira quer capturar as placas de energia solar que viram lixo - NeoFeed

Ao revisar as patentes relacionadas a tecnologia de RMFV de c-Si, observou-se uma ampla gama de métodos e tecnologias utilizadas para recuperar materiais valiosos desses dispositivos que envolve equipamentos ou processos para desmontar as estruturas dos módulos. Geralmente os PV são feitos de ligas de alumínio e representam uma fração significativa da massa dos módulos, tornando-os difíceis de serem tratados termicamente ou quimicamente. Houve também um número considerável de patentes para remoção dos encapsulantes (principalmente EVA), a maioria das quais envolvia equipamentos para separar os módulos FV e para o processamento do EVA com base na trituração dos PV.

Entre os métodos químicos, a maioria das patentes envolvia o processamento de células solares recuperadas dos módulos. Também houveram patentes de métodos que inchavam ou dissolvem quimicamente os EVAs nos módulos para separação dos mesmos. A maioria dos métodos térmicos envolvia principalmente a decomposição térmica dos EVAs, enquanto também havia algumas patentes para o processamento de células solares e fitas de cobre.

Apenas uma patente foi baseada em método óptico, que envolvia a irradiação

com laser em um módulo posicionado verticalmente para separar o vidro do módulo montado. Quanto aos métodos combinados, a maioria das patentes era para tecnologia de tratamento do EVA, já que a remoção do EVA pode ser feita usando métodos térmicos, mecânicos e químicos, ou várias combinações dos três. Também houve patentes para métodos combinados para tratar células solares, a maioria das quais era recuperação de Silício. (IEA, 2021; 2018).

O projeto europeu RESOLVED, por exemplo, utiliza o tratamento térmico para a separação de materiais, enquanto a empresa Deutsche Solar emprega processos térmicos e manuais para a separação de vidro e polímeros do restante do painel. Já o estudo de Berger et al. propõe uma separação mecânica à úmido para a recuperação de materiais sem o uso de agentes químicos. Apesar dos avanços nessa área, ainda há desafios a serem superados.

Um dos principais é a obtenção de materiais de alta pureza, especialmente no caso dos painéis solares CIGS, que contêm elementos químicos raros de grande interesse para a indústria. Para isso, é necessário que os processos de recuperação sejam capazes de remover contaminantes como o escândio, titânio, vanádio, cromo, manganês, ferro, cobalto, níquel e zinco. A First Solar é uma empresa estadunidense que fabrica e recicla módulos de CdTe de película fina, com usinas de reciclagem localizadas nos Estados Unidos e na Alemanha, que comercializam 90 % de todos os módulos por meio do sistema de logística reversa da empresa. Os módulos são triturados com amoladores de facas e martelos. Isto foi seguido por lixiviação ácida com peróxido de hidrogênio em um tambor rotativo. 90 % extrator de vidro, 95 % semicondutor e 80 % telúrio (99,7 % de pureza), (Tao et al, 2015; Granata et al., 2014).

Outro desafio é a baixa quantidade de alguns materiais presentes nos painéis solares, como cádmio e telúrio, o que dificulta sua recuperação. Para superar essa dificuldade, Simon et al. propõem o uso de técnicas de separação térmica e mecânica em vez de processos químicos. Além dos desafios técnicos, há também questões econômicas e regulatórias a serem consideradas na reciclagem de painéis solares. A falta de incentivos financeiros e a falta de regulamentação adequada podem desestimular as empresas a investirem nessa prática.

Apesar desses desafios, a reciclagem de painéis solares é uma prática cada

vez mais necessária e urgente. A escassez de recursos naturais e a necessidade de reduzir os impactos ambientais da produção de energia tornam essa prática essencial para garantir um futuro sustentável. É preciso, portanto, investir em pesquisas e tecnologias que tornem a reciclagem de painéis solares mais eficiente e economicamente viável (Berger, 2014; Gustafsson, 2014; Simon, 2015; Resolved, 2021; Deutsche Solar, 2021).

3.12 Os Impactos Ambientais e Toxicológicos dos Resíduos de Painéis Solares Fotovoltaicos e Caracterização de seus componentes.

A gestão adequada de resíduos sólidos é uma questão crucial para a preservação do meio ambiente. O estudo de Ramos-Ruiz *et al.* (2017) aponta que a liberação de Cd e Te é maior em aterros “jovens”, devido ao baixo pH predominante nesse ambiente. Já em aterros maduros, com pH alcalino, a baixa corrosão do CdTe permite apenas a liberação superficial de espécies solúveis. A NBR 10005 e 10004 estabelecem os procedimentos para obtenção de extratos lixiviados e limites de concentração permitidos para a classificação dos resíduos sólidos.

Nos EUA, o TCLP é utilizado para caracterizar o potencial de lixiviação de resíduos sólidos e determinar se devem ser classificados como perigosos. O limite de TCLP para cádmio é de 1 mg/L. Enquanto alguns estudos relataram concentrações inferiores a 1 mg/L, outros obtiveram concentrações superiores a 9 mg/L, que devem ser classificados como perigosos. É necessário um gerenciamento adequado para garantir a segurança ambiental.

Para painéis de primeira geração, Dias (2015) obteve resultados através de espectroscopia de absorção atômica para ensaio de lixiviação (NBR10005), com resultados inferiores a 0,5 mg/L. Desta forma, é classificado como Classe II, não-perigosos. Segundo Souza, Morassuti e De Deus (2018), a concentração de metais pesados na flora pode ocasionar espécies reativas de oxigênio, gerando estresse oxidativo danificando membranas, pigmentos fotossintéticos, proteínas, ácidos nucleicos e lipídios. Esse desequilíbrio pode afetar o desenvolvimento e a sobrevivência desses seres vivos.

Além disso, a bioacumulação e a biomagnificação desses metais na fauna podem levar a um aumento progressivo da concentração dessas substâncias ao longo da cadeia alimentar. Esses metais podem ser absorvidos por via respiratória, dérmica ou digestiva, concentrando-se em diferentes tecidos do ser vivo. Se consumidos pelo ser humano, podem provocar distúrbios no metabolismo. É importante monitorar e controlar a presença desses metais no meio ambiente para garantir a saúde e o equilíbrio dos ecossistemas (Angheben, 2019). O Instituto Nacional do Câncer - INCA e Ministério da Saúde, lançaram em 2013 Diretrizes para a Vigilância do Câncer Relacionado ao Trabalho que descreve a seguinte informação a cerca de metais:

Os metais podem se apresentar de forma pura ou combinada com outros metais ou como contaminante de misturas. Para alguns metais existem evidências suficientes de carcinogenicidade para o homem. Pode-se destacar o arsênio, o berílio, o cádmio, o níquel e o cromo hexavalente. O chumbo e o mercúrio são considerados suspeitos de causarem câncer (categorias “provável” e “possível” pela IARC - grupos 2A e 2B, respectivamente). INCA, 2013. p. 37.

A carcinogenicidade é um fator de grande preocupação em ambientes de trabalho e na saúde pública. A ausência de dados sobre a carcinogenicidade em seres humanos ou animais implica que as substâncias não devem ser designadas como cancerígenas. De acordo com a ACGIH (Conferência Americana Governamental de Higiene Industrial), trabalhadores expostos a cancerígenos A1 não devem estar sujeitos a nenhum limite de exposição e devem ser adequadamente protegidos para evitar qualquer possibilidade de exposição. Para os cancerígenos A1¹³ com TLV e para os A2¹⁴ e A3¹⁵, a exposição dos trabalhadores deve ser cuidadosamente

¹³ A1 – Carcinógeno humano confirmado: o agente é cancerígeno para o ser humano, com base em evidências de estudos epidemiológicos

¹⁴ A2 – Carcinógeno humano suspeito: os dados são conflitantes ou insuficientes para confirmar o agente como cancerígeno para o homem, ou seja, o agente é cancerígeno em experimentos animais nas doses, por via de administração, em locais, tipos histológicos, ou por mecanismos considerados relevantes para a exposição de trabalhadores. A notação A2 é usada principalmente quando há evidência limitada de carcinogenicidade em seres humanos e evidência suficiente de carcinogenicidade nas experiências em animais, com relevância para os seres humanos.

¹⁵ A3 – Carcinógeno animal confirmado com relevância desconhecida para seres humanos: o agente é cancerígeno em experimentos com animais em doses relativamente altas, por vias de administração, em locais, tipos histológicos ou por mecanismos considerados não relevantes para a exposição de trabalhadores. Os estudos epidemiológicos disponíveis não confirmam um aumento do risco de câncer em seres humanos expostos. As evidências disponíveis não sugerem que este agente seja um provável causador de câncer em seres humanos, exceto sob condições excepcionais de via de ingresso no organismo ou de nível de exposição

controlada e mantida abaixo do TLV, por qualquer via de absorção. Para a IARC,(2006b, p.5),

Um agente é denominado como “cancerígeno” se for capaz de aumentar a incidência de neoplasmas malignos, reduzindo sua latência ou aumentando sua severidade ou multiplicidade. A indução de neoplasma benigno pode, em algumas circunstância, contribuir para o julgamento de que um agente é cancerígeno. (IARC, 2006b, p.5)

De acordo com a NBR 10004/2004, a classificação de resíduos fornece informações sobre seus aspectos toxicológicos dentre as categorias: classe I - perigosos, classe II - não perigosos, classe IIA - não perigosos e não-inertes e classe IIB - não perigosos e inertes.

Na Tabela 4, temos a composição dos painéis de silício cristalino que podem apresentar variações dentro de determinados limites. Com a evolução das tecnologias e materiais utilizados, a estrutura dos painéis tem passado por diversas modificações ao longo dos anos, como é o caso das tecnologias PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*), *half-cells* e *double glass*, como descrito por Tammara *et al.* (2015).

Tabela 4: Composição das Células de Silício Cristalino
COMPOSIÇÃO DAS CÉLULAS DE SILÍCIO CRISTALINO.

ELEMENTO	PORCENTAGEM DA AMOSTRA NO - MÓDULO A	PORCENTAGEM DA AMOSTRA NO - MÓDULO B
SILÍCIO	98,20%	95,27%
COBRE	0,04%	1,85%
PRATA	1,40%	1,12%
CROMO	0,14%	0,15%
CHUMBO	0,08%	0,10%

Fonte: Adaptado de Benevit e Veit (2014)

a) O vidro é composto principalmente por sílica, como descrito por Maia (2017). No entanto, na fabricação de painéis solares, é necessário utilizar vidro com baixo teor de ferro para permitir maior passagem de luz e o vidro deve ser temperado para garantir a integridade física do painel. De acordo com Benevit e Veit (s.d), em

resultados experimentais, o vidro pode ser tratado como vidro comum, pelo menos para módulos de primeira geração, uma vez que não apresenta nenhum componente diferenciado. Os resultados da análise por espectrometria de fluorescência de Raios-X para dois módulos de diferentes fabricantes de silício cristalino estão na tabela.

Tabela 5: Composição do Vidro
COMPOSIÇÃO DO VIDRO

ANALITO	PORCENTAGEM MÉDIAS
SiO ₂	78,72%
CaO	13,44%
Na ₂ O	2,45%
MgO	1,46%
Al ₂ O ₃	1,59%
SO ₃	0,60%
K ₂ O	0,37%
FeO ₃	0,23%

Fonte: Adaptado de Benevit e Veit (2014)

Conforme indicado por Deng *et al.* (2019), a deposição direta de vidro de resíduos de painéis solares resulta em uma perda permanente de recursos que poderiam ser recuperados. No entanto, é importante considerar que as estratégias de reciclagem dos componentes, incluindo o vidro que é difícil de separar dos módulos, dependem de recursos financeiros significativos, devido às tecnologias aplicadas ao processo de separação.

b) O silício é um dos principais componentes das células fotovoltaicas, representando até 5% do peso do painel. Na maioria dos casos, o silício constitui mais de 95% da massa da célula fotovoltaica. O tipo de silício utilizado na indústria fotovoltaica é o silício grau solar, que apresenta alta pureza, entre 99,9999% e 99,999999%. É importante ressaltar que o silício é um elemento relativamente inerte e não apresenta riscos à saúde humana ou ao meio ambiente. No entanto, é importante destacar que o silício pode ser dissolvido em ácido fluorídrico, formando ácido hexafluorosilícico (H₂SiF₆). Além disso, o silício pode reagir com bases, como hidróxido de sódio, formando silicatos. A reação com halogênios também pode ocorrer, formando seus respectivos haletos. A classificação do silício não é

mencionada na NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

c) A separação da camada de EVA que envolve a célula é um dos maiores desafios no processo de reciclagem dos painéis solares, sendo necessárias técnicas de decomposição térmica e química para ter acesso ao conjunto encapsulado. O EVA não é considerado cancerígeno pelas organizações responsáveis e não apresenta efeitos adversos conhecidos na saúde humana. No entanto, é de difícil biodegradação e pode apresentar efeitos adversos em organismos vivos.

d) O Fluoreto de Polivinila, também conhecido como PVF ou Tedlar® um material termoplástico que é resistente a produtos químicos (com exceção de acetonas, ésteres, ácido clorídrico concentrado, ácido sulfúrico, ácido nítrico e amoníaco) e intempéries. No entanto, a queima desse material pode apresentar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Nesse sentido, é importante ter cuidado no manuseio de resíduos fotovoltaicos derivados de fluoropolímeros para evitar a formação de compostos persistentes que podem ser liberados no meio ambiente. O PVF é considerado um resíduo de plásticos polimerizados não perigosos, conforme a NBR 10004/2004. (Danz *et al.*, 2019). De acordo com autores como Crys *et al.*, 2014 e Tamaro *et al.*, 2015, Ramos-Ruiz *et al.*, 2017, Benevit e Veit, 2014; os painéis solares de primeira e segunda geração são compostos por vários materiais, incluindo silício, cobre, prata, chumbo, alumínio, estanho, telúrio, cádmio, molibdênio, índio e gálio. Se esses materiais forem descartados inadequadamente, podem ser extremamente perigosos e tóxicos para o meio ambiente. É importante garantir que os módulos solares sejam descartados corretamente para evitar danos acidentais causados por incêndio, choque térmico ou exposição aos elementos em aterros sanitários ou outros locais inadequados.

e) Cádmio. O descarte de painéis de CdTe em aterros sanitários tem sido alvo de preocupação devido à possível liberação de cádmio e exposição humana a esse material. O cádmio é associado a diversas doenças, como osteoporose, disfunção renal e hipertensão. Órgãos da saúde o classificam como provável, conhecido ou suspeito carcinógeno humano. No entanto, estudos mostram que as células fotovoltaicas estão encapsuladas de forma que o cádmio não é prontamente

biodisponível e, portanto, menos provável de ser tóxico. O cádmio em painéis fotovoltaicos de CdTe que é encapsulado entre camadas impermeáveis não é muito solúvel. É importante considerar essa perspectiva antes de tomar decisões sobre o descarte desses materiais.

f) Chumbo. A presença de chumbo em painéis fotovoltaicos de silício cristalino e filmes finos tem sido um tema preocupante. Estudos dos autores Dias (2015) e Benevit e Veit (2014) mostram que o chumbo ultrapassa os limites legais em mais de 5 vezes considerando a NBR (10005), para água potável e águas urbanas e industriais descarregadas no solo em grande parte dos lixiviados examinados, sendo assim classificado como resíduo classe I, perigosos. A substituição do chumbo por prata na produção dos painéis tem reduzido a presença deste metal, mas ainda é um problema em painéis fabricados antes de 1997. Além disso, a concentração do lixiviado varia de acordo com o ano de produção dos painéis, indicando que diferentes tecnologias podem apresentar composições diferentes de metais. O chumbo é extremamente danoso para a saúde humana, podendo afetar diversos sistemas e órgãos, incluindo o sistema nervoso central e periférico. A Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer classificou o chumbo inorgânico como "possivelmente carcinogênico para humanos" grupo 2B. "Nos Estados Unidos, o chumbo é considerado a segunda substância mais perigosa em uma lista das 20 substâncias mais perigosas, ficando atrás apenas do arsênio". (Who, 1995).

g) Cromo. Experimentos realizados por Dias (2015) e Tammaro *et al* (2016), foram encontradas quantidades de cromo nas amostras de painéis solares de silício cristalino e de filmes finos de silício amorfo, respectivamente. Embora as quantidades de cromo encontradas por Dias tenham sido bem abaixo do limite máximo permitido pela NBR 10004, as quantidades encontradas por Tammaro *et al*. excederam em 10 vezes os limites da legislação europeia para a água potável (Diretiva 98/83/CE).

O cromo é comumente usado na fabricação de ligas metálicas, o que sugere que a parcela desse material encontrado nos testes de lixiviação possivelmente pode estar presente nos contatos metálicos dos painéis solares. O cromo pode conferir resistência à oxidação, ao desgaste e ao atrito. É importante destacar que a forma metálica do cromo não é encontrada livre na natureza e a sua toxicidade depende do

seu estado de oxidação, sendo o cromo (VI) mais tóxico que o cromo (III).

A ingestão acidental de altas doses de compostos de cromo (VI) pode causar falência renal aguda caracterizada por perda de proteínas e sangue na urina. Já o cromo (III) é um nutriente essencial para o ser humano, atuando na manutenção do metabolismo da glicose, lipídeos e proteínas, e a deficiência do cátion acarreta prejuízo na ação da insulina. Além disso, o cromo metálico e a sua forma trivalente são caracterizados pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer -IARC como não carcinogênicos. No entanto, os compostos de cromo (VI) são classificados pela mesma agência como cancerígenos para o ser humano (CETESB, 2017).

h) Prata. A prata geralmente constitui em torno de 1,4% em massa do peso da célula fotovoltaica e está presente nos contatos metálicos, substituindo o uso do chumbo ao longo dos anos. No entanto, nos estudos de Dias (2015), não houveram quantidades detectáveis desse material, para um limite de detecção de 0,015 mg/L determinado pelo método utilizado. Por outro lado, os autores Tammaro et al. (2016) chegaram a encontrar uma quantidade de até 6,938 mg/L de prata em painel de silício cristalino, de acordo com os procedimentos experimentais adotados para obter as concentrações de metal detectadas em lixiviados de painéis de silício cristalino e de filmes finos. Apesar de ser classificada como um metal pesado, não há menção nas diretivas 98/83/CE e 2000/60/CE quanto aos limites máximos de prata permitidos por essas leis. No entanto, para os experimentos padrões adotados pela NBR 10005/2004, o limite máximo permitido nos ensaios de lixiviação é de 5,0 mg/L. Além disso, a NBR 10004/2004 classifica a prata como substância que confere periculosidade aos resíduos, ainda que seja um material tido como menos tóxico que o chumbo. Quanto à toxicidade, Dos Santos, Colasso e Moneró (2015) apontam que, dependendo da dose e do tempo de exposição, a prata pode provocar efeitos dermatológicos, imunológicos e neurológicos, além da perda de peso. Outrossim, os dados experimentais indicam que o efeito letal em ratos foi observado apenas após a exposição a compostos de prata inorgânica em doses extremamente altas.

i) Cobre. É esperado encontrar cerca de 0,04% a 1,85% em massa de cobre, com relação ao peso total da célula de silício cristalino. No caso, nos painéis de filmes finos, esse percentual é igual a 0,85% e 1% para as tecnologias de silício amorfo, CIS e CIGS, respectivamente (Dias, 2015). O cobre está presente nos

filamentos metálicos nesses painéis, e no caso das tecnologias de filmes finos, na composição das células fotovoltaicas de CIGS, sob a forma de liga metálica. Tammaro et al. (2016), em seus ensaios de teste de lixiviação, verificou que apenas um painel, com tecnologia CIGS, ultrapassou em 6 vezes os limites da lei italiana para águas urbanas e industriais lançadas no solo (D.lgs 152/06). Não foram encontrados dados de teste de lixiviação do cobre em painéis solares seguindo a NBR 10004/2004. O cobre naturalmente ocorre na natureza e constitui um micronutriente essencial para a vida, sendo normalmente de fácil regulação pelo organismo. No entanto, quando presente em altas concentrações, o cobre pode causar danos ao fígado, aos rins e ao cérebro. Em estudo realizado por Kemerich et al. (2014), foi verificado que um determinado aterro analisado apresentava contaminação no solo por esse metal, constatando-se que o mesmo, por conta da localização, poderia atingir e contaminar o solo e os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, pondo em risco a população que vive nas proximidades da área.

j) Alumínio. A principal utilização do alumínio nos painéis é na moldura que os envolve, mas, também pode compor os eletrodos traseiros. Sobre a ocorrência desse metal, Tammaro et al. (2016) verificou, em ensaios de teste de lixiviação, que cerca de 76,9% das amostras de painéis solares de silício cristalino analisados ultrapassaram os limites da legislação europeia para água potável (Diretiva 98/83/CE). Já para os painéis solares de filmes finos, praticamente todos ultrapassaram o limiar estabelecido pela lei italiana para águas urbanas e industriais lançadas no solo (D.lgs 152/06) e pela legislação europeia para água potável (Diretiva 98/83/CE).

k) Estanho. A utilização do estanho nos painéis é, principalmente, na composição das ligas empregadas como contatos metálicos, eletrodos frontais e pastas de solda. No entanto, nos painéis fabricados mais recentemente, observa-se uma tendência na substituição desse material por prata. O estanho é um metal resistente a corrosão e quimicamente estável. Por ser pouco solúvel em água, a Organização Mundial da Saúde classifica-o como pouco tóxico, não representando um problema para a saúde humana, tendo em vista a baixa absorção e rápida excreção. No entanto, é preciso que se preocupe com a recuperação desse metal, tendo em vista que a mineração para a sua obtenção é um processo com relevante impacto ambiental (Savazzi, 2013).

l) Índio, Gálio, Telúrio e Molibdênio. Os painéis em CIGS e CdTe, dentre as tecnologias por esse estudo analisadas, são os que apresentam maior ocorrência de metais raros, como o índio, o gálio e o telúrio. Além disso, conforme representado na Figura 2, o CIGS é, dentre as 3 tecnologias de filmes finos, a única que emprega molibdênio como contato traseiro. Em contrapartida, em ensaios de lixiviação realizados por Tammaro et al. (2016), verificou-se que os painéis de filmes finos analisados que foram fabricados após o ano de 2010 apresentaram alto teor de molibdênio, demonstrando que não só as tecnologias CIGS utilizam o metal como contato traseiro. Ainda assim, as leis locais que serviram de referência para o estudo não estabeleceram um limite de concentração do metal no ensaio de lixiviação, assim como para o índio, gálio e telúrio. Esses dois primeiros foram detectados em painel solar de CIGS.

A ABNT não cita esses metais na sua NBR 10004/2004. Com relação ao molibdênio, sabe-se que esse metal apresenta grande resistência contra a corrosão e que este constitui um micronutriente essencial para os seres vivos, atuando na síntese e ativação de uma enzima que realiza a redução do nitrato e também é essencial para a fixação do nitrogênio em leguminosas. Além disso, auxilia no crescimento de plantas superiores, evitando quedas prematuras e encurvamento das folhas velhas. Logo, altas concentrações de molibdênio raramente atrasam o crescimento da flora, mas podem causar problemas aos organismos de animais ruminantes que se alimentam dessas plantas. Outrossim, o excesso de molibdênio no ambiente pode causar mortalidade de peixes, de plânctons e acumulações em peixes e moluscos (Jacob Neto; Rosseto, 1998).

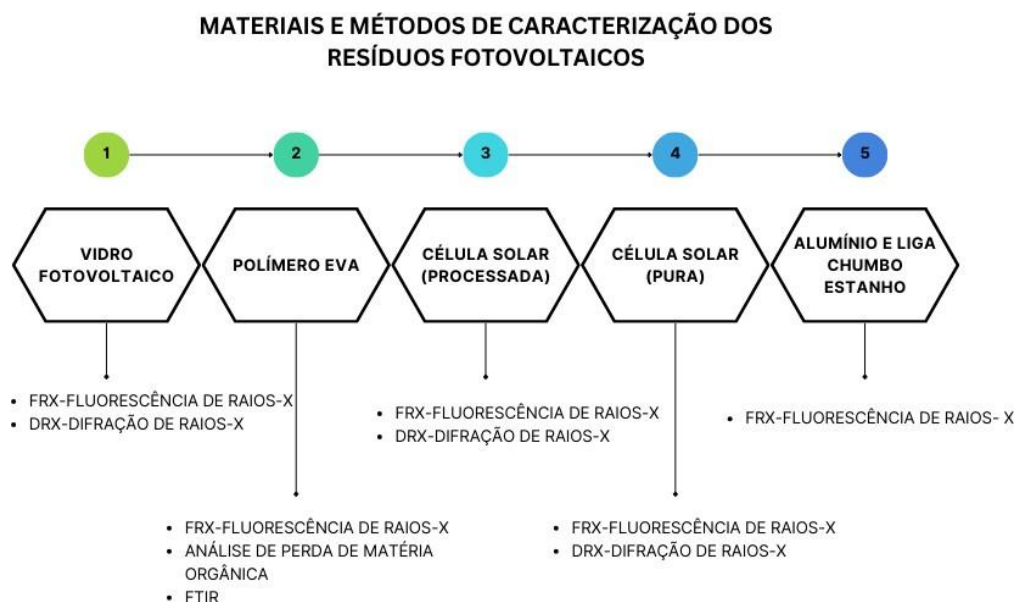
O índio e o gálio estão incluídos na lista da Comunidade Europeia de matérias-primas críticas por seu risco de fornecimento e alta importância econômica. Se esses metais são descartados em aterro sanitário, perde-se a oportunidade de serem recuperados e inseridos novamente como matéria-prima. Com isso, a extração cada vez maior desses minérios causa sobrecarga ambiental significativa e Amarakoon et al (2018), em estudo aplicando a ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida - ACV, já destacaram impactos relevantes nas categorias de ecotoxicidade, saúde humana, eutrofização e destruição da camada de ozônio principalmente relacionados aos metais extraídos. Além disso, o telúrio também é um material extremamente escasso, obtido como subproduto do processamento de minérios de cobre, chumbo, ouro e

bismuto (Amato; Beolchini, 2018).

Desta forma, as energias renováveis são fundamentais para garantir um futuro sustentável para o planeta. Além de contribuírem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, elas ajudam a preservar os recursos naturais e a diversidade biológica. A economia circular e a reciclagem de resíduos fotovoltaicos também são importantes para minimizar o impacto ambiental da produção de energia solar, uma vez que a fabricação de células fotovoltaicas envolve a utilização de alguns metais tóxicos, como o chumbo e o cádmio.

Com isso, o foco deste trabalho está na caracterização desses materiais para entender melhor como eles podem ser reciclados e reaproveitados na cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais. Além disso, a reciclagem de resíduos fotovoltaicos pode gerar novas oportunidades de negócios e empregos, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a reciclagem de resíduos fotovoltaicos pode gerar até US\$ 15 bilhões em receitas até 2050, reduzindo as emissões de dióxido de carbono em até 2,5 milhões de toneladas por ano até 2030.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

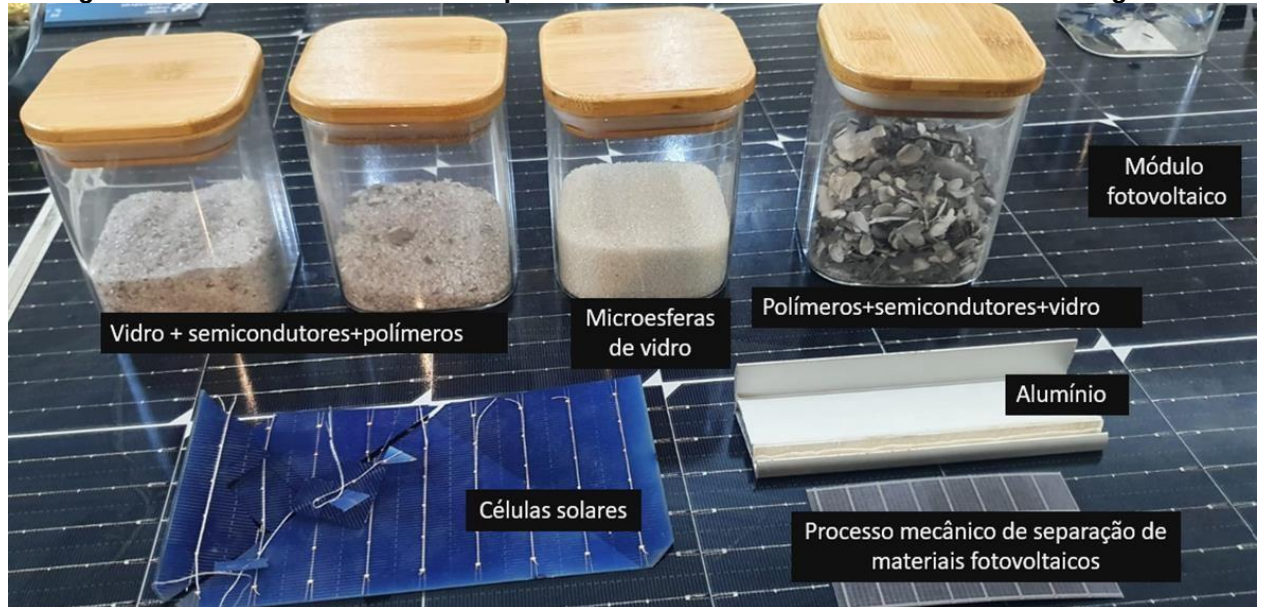


4.1 Coleta dos materiais fotovoltaicos

Os dados apresentados neste trabalho foram resultado de resíduos coletados em uma empresa brasileira que se dedica à reciclagem de materiais fotovoltaicos. A metodologia utilizada pela empresa consiste em um processo mecânico que envolve a moagem dos materiais e a separação por 5 peneiras de gramaturas diferentes. Essa técnica permite a obtenção de materiais com diferentes granulometrias, o que facilita o seu reaproveitamento em novos produtos. Todo o processo é realizado dentro de um contêiner, o que garante a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente. Dessa forma, a empresa consegue evitar a emissão de material particulado e reduzir os impactos ambientais causados pela reciclagem dos materiais fotovoltaicos. Vale ressaltar que a metodologia utilizada pela empresa permite o deslocamento do equipamento para outros locais onde possa haver descomissionamento de parques fotovoltaicos. Isso significa que a empresa pode atuar em diferentes regiões do país, contribuindo para a redução dos impactos ambientais causados pela geração de energia solar e custos excessivos de logística. Atualmente, as empresas do setor fotovoltaico destinam seus resíduos custeando toda logística até o local da

reciclagem, no entanto, não pagam nada pelo processo de reciclagem e destinação dos resíduos às indústrias.

Figura 25 – Resíduos fotovoltaicos processados e coletados na indústria de reciclagem.



Fonte: A autora, 2022

4.2 Preparação Prévia dos Materiais

4.2.1 Preparação prévia do vidro fotovoltaico

O vidro coletado na empresa recicladora estava com gramatura intermediária e com baixa contaminação de outros materiais como EVA e semicondutores. O vidro fotovoltaico FTO é um material utilizado como substrato transparente em células solares. Ele desempenha um papel crucial na absorção e geração de energia a partir da luz solar.

4.2.2 Processo de preparo da amostra de vidro – Pesagem, trituração e peneiramento

Para uma melhor análise e adequação aos equipamentos utilizados, o vidro foi submetido a pesagem (100g) e em seguida inserido em um moinho de bolas PM 100

de bancada. A rotação utilizada foi de 500 rpm, com duração de 10 min e 8 bolas para a rotação centrípeta. Em seguida, o pó de vidro FTO foi peneirado em peneira 150 μ m, conforme demonstrado na Figura 26:

Figura 26 – Processo de pesagem e trituração e peneiramento do vidro.



Fonte: A autora, 2023

4.2.3 Processo de preparo da amostra de vidro – Difração de Raios-X (DRX)

Após ser triturado em um moinho de bolas e passar por uma peneira de 150 μ m, o vidro FTO foi adicionado a lâmina de análise e inserido no equipamento FRX de marca Rigaku Corporation, modelo Miniflex 600, tipo A-26L - Cu, *input* 60kV, 1.5 kW da Universidade Federal de Pernambuco - Campus Caruaru - PE.

4.2.4 Processo de preparo da amostra de vidro – Fluorescência de Raio-X (FRX)

Para essa análise, o vidro foi utilizado na gramatura coletada na indústria de reciclagem, sem acréscimo de nenhum preparo adicional da amostra. O equipamento utilizado é um HORIBA SCIENTIFIC de mesa -50, do Instituto Nacional de Tecnologia

em União e Revestimento de Materiais - INTM utilizado pelo Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais - LEM da Universidade Federal de Pernambuco.

4.3 Preparação prévia do polímero – EVA

O EVA (Etileno Vinil Acetato) é um material amplamente utilizado na fabricação de painéis fotovoltaicos, desempenhando um papel essencial na encapsulação das células solares e na proteção contra agentes externos. Ele apresenta características específicas, composição química e diversas aplicações na indústria fotovoltaica.

4.3.1 Processo de preparo da amostra de EVA – Moagem e peneiramento

O EVA, devido a cola de “silicone”, possui uma aderência significativa de outros materiais como vidro e semicondutores, à sua estrutura, quando o processo de reciclagem é apenas mecânico “Figura 27”. O EVA foi submetido a um moinho de facas e processado por 8 min. Em seguida a amostra foi peneirada por peneiras em 5 gramaturas diferentes (1,18 mm; 75 μ m; 425 μ m; 200 μ m e 150 μ m). Conforme demonstrado na Figura 27.

Figura 27 – Processo de preparo do EVA para análise.



Fonte: A autora, 2023.

4.3.2. Análise de perda de matéria orgânica

As amostras de EVA em diferentes gramaturas foram pesadas e submetidas à estufa por 1h, até 110°C. Em seguida, foram pesados novamente, submetidos a aquecimento é comparado sua massa após aquecimento (até 800°C por 1h, com taxa de 10° C|min.), conforme representado na Figura 28:

Figura 28 – Amostras do EVA (antes | pós-aquecimento).

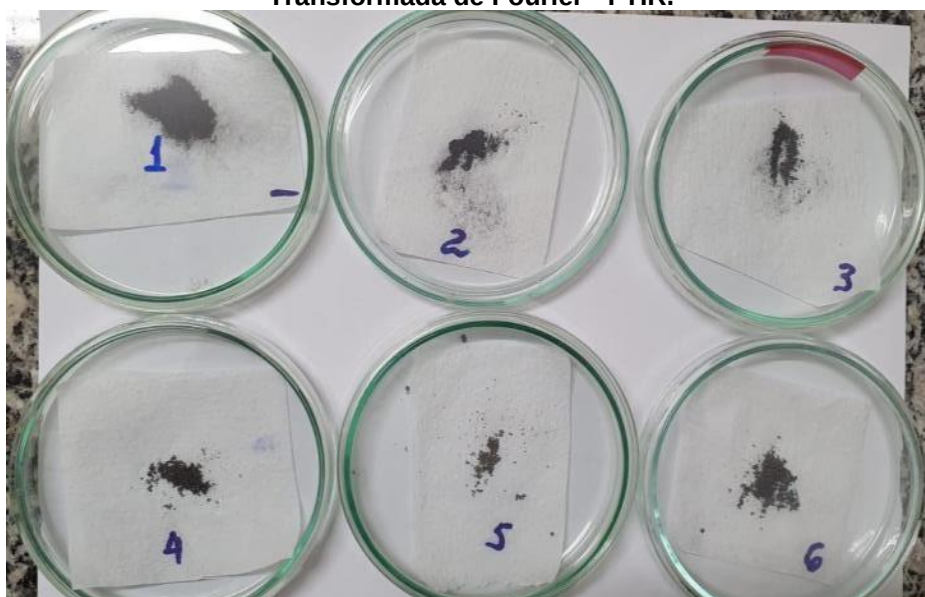


Fonte: A autora, 2023

4.3.3. Processo de preparo da amostra de EVA – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR

Foram preparadas 06 (seis) amostras através de trituração e peneiramento conforme apresentado na Figura 29, mais 01 (uma) amostra em tamanho natural coletado na indústria de reciclagem. O equipamento utilizado é da marca Shimadzu e modelo *IRPrestige-21 - Fourier Transform Infrared Spectrophotometer* utilizado no laboratório de Química da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Caruaru-PE.

Figura 29 – Amostras do EVA para análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR.



Fonte: A autora, 2023

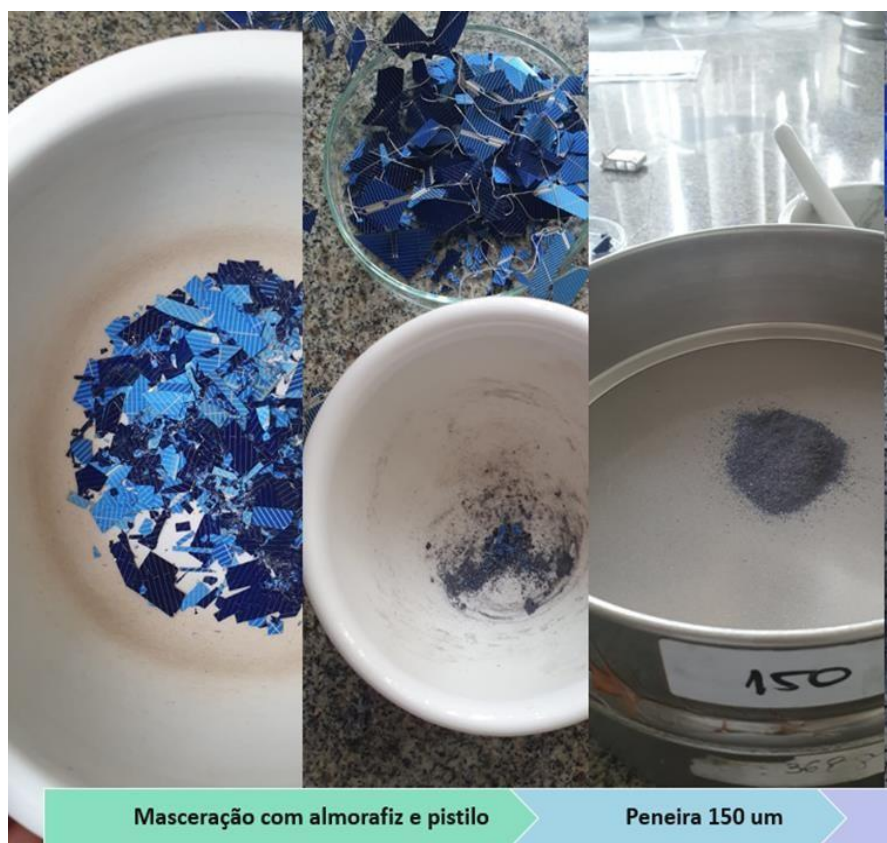
4.4 Preparação prévia das células solares

As Células solares de silício monocristalino e policristalino são duas das tecnologias mais comumente utilizadas na fabricação de células solares. No entanto, a empresa recicladora processa diversos tipos de células. A amostra em questão é uma célula pura de silício policristalino. Na tabela a seguir, está apresentado algumas características das CS existentes no mercado. Esta tabela resume as características, composição química, aplicações e eficiência de diferentes tipos de células solares. É importante observar que as eficiências mencionadas são médias e podem variar dependendo dos avanços tecnológicos e das condições de fabricação.

4.4.1 Processo de preparo da Célula Solar Pura

A célula solar pura foi submetida à maceração com almofariz e pistilo até a obtenção de partículas bem pequenas que foram submetidas a peneiração de gramatura de 150 μm . Em seguida, o material foi submetido a pesagem (5,23 g) e adição de ácido bórico PA (H_3BO_3) para formar uma matriz homogênea que reduz os efeitos de absorção e espalhamento de radiação. Posteriormente o material foi prensado em prensa hidráulica de 8 ton para aumentar a homogeneidade e a área de superfície exposta. Após a formação da pastilha (Pelletização) e aumento da densidade da amostra. O analito seguiu para medição e análise no detector de Raios-X que mediu as energias de Raios- X fluorescente emitido, permitindo a identificação dos elementos presentes e a quantificação de suas concentrações, conforme demonstrado na figura 30 – Preparo e análise da amostra de células solares puras.

Figura 30 – Preparo e análise da amostra de células solares puras.



Fonte: A autora, 2023

4.5 Processo de preparo dos semicondutores da Célula Solar (processada em método mecânico de separação)

A amostra da célula solar processada através de método mecânico foi coletada em gramatura adequada para análise. Desta forma, foi submetida a pesagem em balança analítica, a adição de ácido bórico PA (H_3BO_3) a 40%. Posteriormente o material foi prensado em prensa hidráulica de 8 ton para aumentar a homogeneidade e a área de superfície exposta. Após a formação da pastilha (Pelletização) e aumento da densidade da amostra. O analito seguiu para medição e análise no detector de Raios-X que mediu as energias de Raios-X fluorescente emitido, permitindo a identificação dos elementos presentes e a quantificação de suas concentrações, conforme demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Preparo para análise da amostra de células solares processadas mecanicamente.

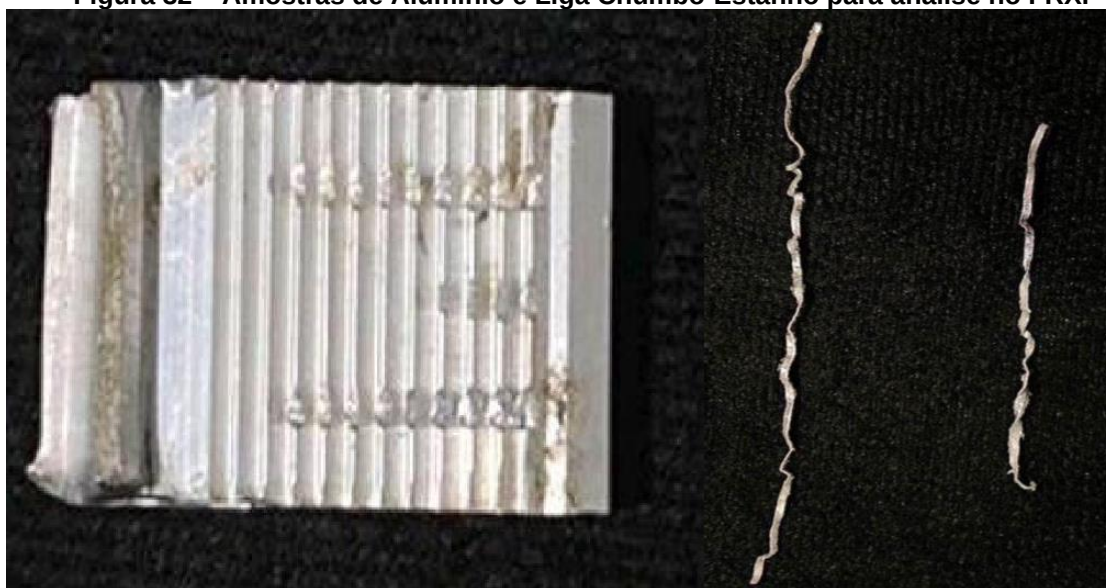


Fonte: A autora, 2023

4.6 Processo de preparo do Alumínio e liga de Chumbo-Estanho

Para essa análise, o Alumínio e a liga Chumbo-Estanho foram analisados sem acréscimo de preparo, ou seja, da forma que foram coletados na indústria de reciclagem. Durante o processamento, a liga de Chumbo-Estanho se desprende do wafer de vidro e EVA no momento do processamento, ficando dispersa dos outros materiais, assim como a moldura de alumínio que é retirada antes que o módulo fotovoltaico seja triturado no processo mecânico de separação dos materiais. O equipamento utilizado é um HORIBA SCIENTIFIC de mesa - 50, do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais - INTM utilizado pelo Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais - LEM da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE.

Figura 32 – Amostras de Alumínio e Liga Chumbo-Estanho para análise no FRX.



Fonte: A autora, 2023

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X - FRX

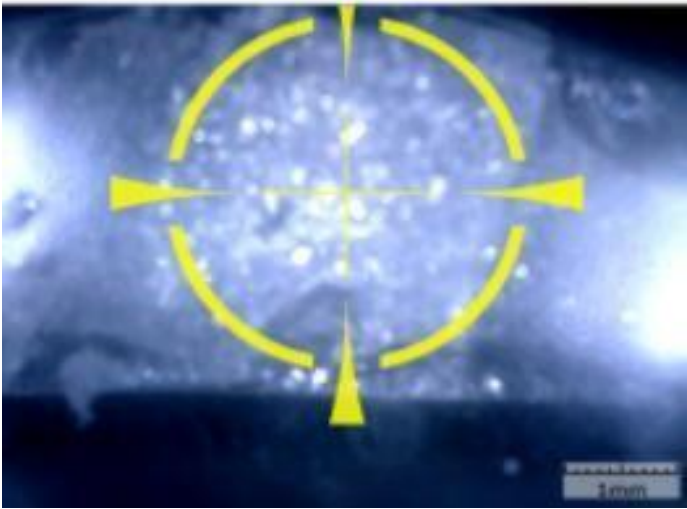
A configuração utilizada para análise do analito (vidro) está descrita na tabela abaixo:

Tabela 6 – Configuração utilizada no software do FRX.

Voltagem	15 kV
Filtro	Baixo
Tempo	60 s
Corrente	200 μ A
Colimador	3 mm
Tempo de processamento	Processo 2
Unidade	wt%
Linha	K α

Fonte: A autora, 2023

Figura 33 – Imagem da área analisada no vidro.



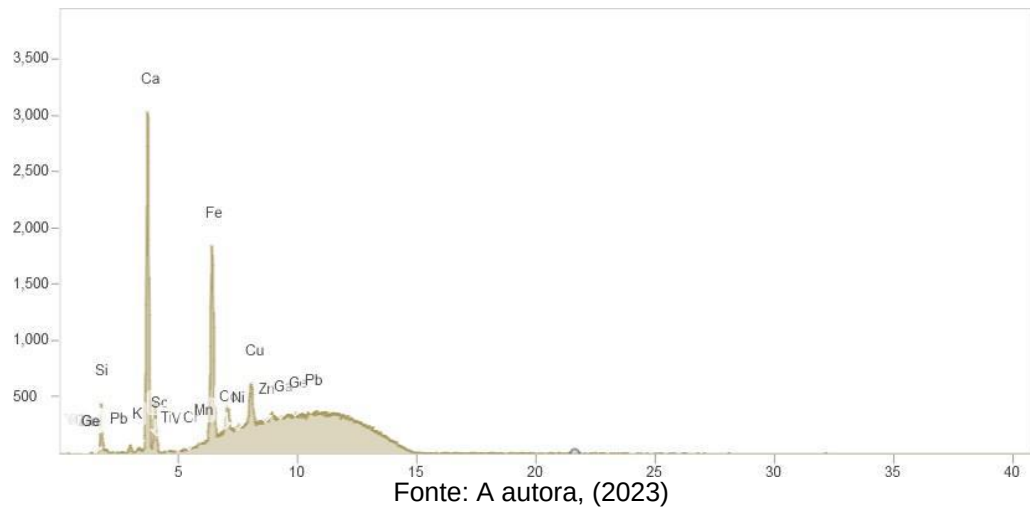
Fonte: A autora, 2023

Tabela 7 – Composição química obtida por FRX dos elementos presentes no vidro.

FRX DO VIDRO										
Componentes	Si	Ca	Ar	Al	S	Sc	Fe	K	Pb	Cl
Percentual %	68.2906	28.3644	0.4601	0.5728	0.2351	0.2249	1.133	0.3388	0.0762	0.0111
Componentes	Zn	Ni	Cu	Ga	Cr	Co	Mn	Ge	V	Ti
Percentual %	0.0111	0.0099	0.1814	0.0127	0.0059	0.013	0.0130	0.0073	0.0034	0.0350
Componentes	P									
Percentual %	N/D									

Fonte: Autoria própria (2023)

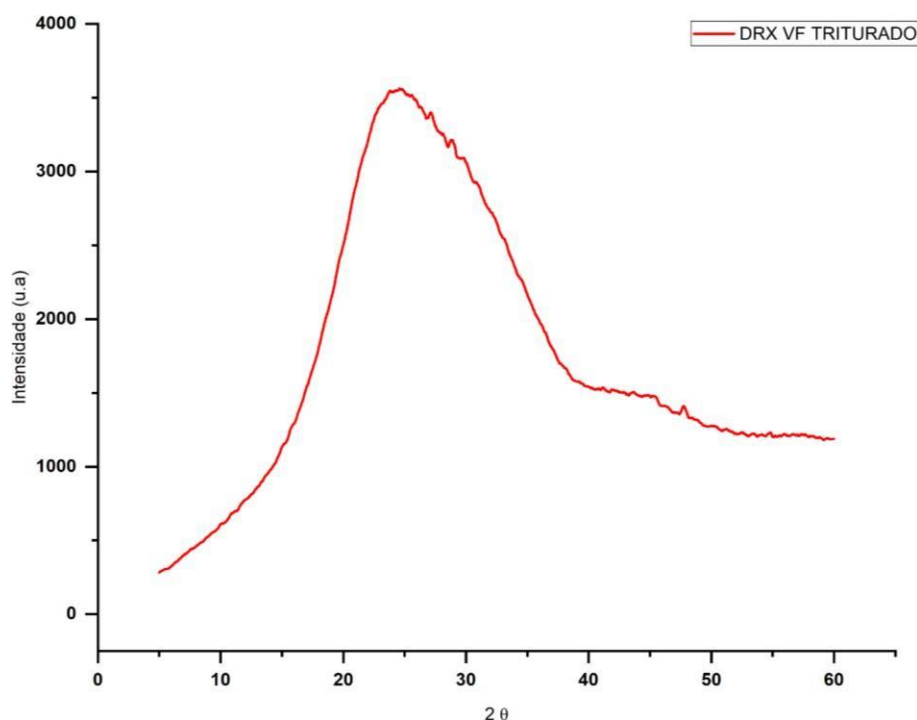
Figura 34 – Espectro da Fluorescência de Raios-X do vidro.



Os resultados demonstrados na Tabela 7, apresentam uma alta concentração de silício (Si) e Cálcio (Ca), ver na figura 46, componentes naturais em vidro. Apresenta ainda escândio (Sc), elemento químico raro que tem várias aplicações importantes em diferentes áreas, como a indústria aeroespacial, eletrônica e de materiais. Ele é usado, por exemplo, na produção de ligas de alumínio para a fabricação de peças de aviões, bem como em lâmpadas de alta intensidade e displays de cristal líquido (Gurzhiz *et al.*, 2015; EPA, 2023; NIOSH, 2023).

No entanto, é importante destacar que o escândio (Sc), ferro (Fe), zinco (Zn), chumbo (Pb) e cobre (Cu) são elementos químicos que podem se tornar tóxicos em altas concentrações. Esses elementos podem estar presentes no vidro devido à contaminação no processo de reciclagem, mas ainda assim podem ser reaproveitados em diversos segmentos industriais.

Figura 35 – Difratoograma de Raios-X do vidro- triturado.



Fonte: A autora, 2023.

De acordo com o Difratoograma de Raios-X do vidro, apresentada na figura 35, é possível perceber que trata-se de um material amorfo e segundo Lin et al. (2015) há presença de dióxido de silício (SiO_2) no vidro. Segundo o site Neofed (2023)¹⁶ o vidro reciclado pode ser utilizado de diversas formas na indústria, incluindo como abrasivo (micro esferas) para polimentos e como material para a produção de refletores em tintas asfálticas. Isso é possível porque o vidro é um material resistente e durável, que pode ser triturado e transformado em partículas finas para uso em diferentes aplicações.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o vidro é um dos materiais mais reciclados no Brasil, com uma taxa de reciclagem de cerca de 50%. A reutilização do vidro reciclado na indústria é uma forma importante de reduzir a demanda por matérias-primas virgens e contribuir para a preservação dos recursos naturais.

¹⁶ <<https://neofeed.com.br/inovacao/empresa-brasileira-quer-capturar-as-placas-de-energia-solar-que-viram-lixo/>>. Acesso em: 23 set. 2023.

5.2. Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X do EVA

Tabela 8 – Configuração utilizada no software do FRX para o EVA

Voltagem	50 kV
Filtro	Médio
Tempo	100 s
Corrente	200 μ A
Colimador	3 mm
Tempo de processamento	Processo 2

Fonte: a autora (2023)

Figura 36 – Imagem das áreas analisadas no EVA.

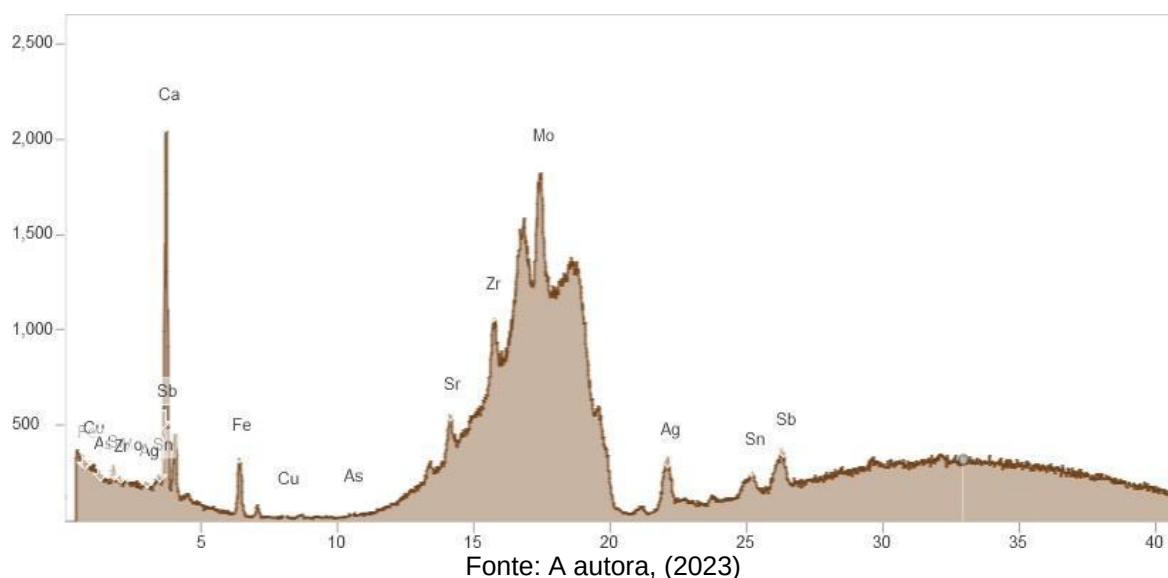


Fonte: A autora, (2023)

Tabela 9 – Composição Química por Fluorescência de Raios-X do EVA

FRX DO COPOLÍMERO EVA									
Componentes	CaO	ZrO2	K2O	Fe2O3	ZnO	TiO2	CuO	SiO2	Si
Percentual %	6.4976	0.0121	0.1637	0.0974	0.0010	0.0648	0.0010	26.4116	45.0753
Componentes	Mo	Ag	Sb	Sn	Sr	As	Ca	Fe	Zr
Percentual %	0.5146	0.1718	1.0808	0.0054	0.0331	0.0044	19.5761	0.3634	0.0049
Componentes	Bi	Cu	Pb	Zn	Al2O3	SO3			
Percentual %	0.0174	0.0151	0.0038	0.0068	N D	N D			

Fonte: autoria própria (2023)

Figura 37 – Espectro da Fluorescência de Raios-X do Copolímero EVA.

O EVA, encapsulador em módulos fotovoltaicos representa 5,1% da massa total e é crucial para sua integridade. A degradação do encapsulador devido à radiação ultravioleta é a principal causa de falha, reduzindo a eficiência em até 80%. A remoção do encapsulador é o primeiro passo na recuperação de materiais, principalmente o EVA, que é um desafio devido à sua predominância. É possível notar na Tabela 9 e Figura 37, que os metais e semicondutores presentes na composição do EVA, são oriundos da célula solar e os óxidos de silício-SiO₂ e de cálcio-CaO, do vidro. Novos materiais, como silicone, estão sendo explorados, oferecendo maior durabilidade, mas enfrentam desafios de preço e processamento. A busca por alternativas ao EVA como encapsulador padrão é influenciada por questões econômicas e técnicas (FIANDRA *et al.*, 2019).

5.3. Caracterização química por Fluorescência de Raios – X (FRX) dos elementos presentes na célula solar processada mecanicamente

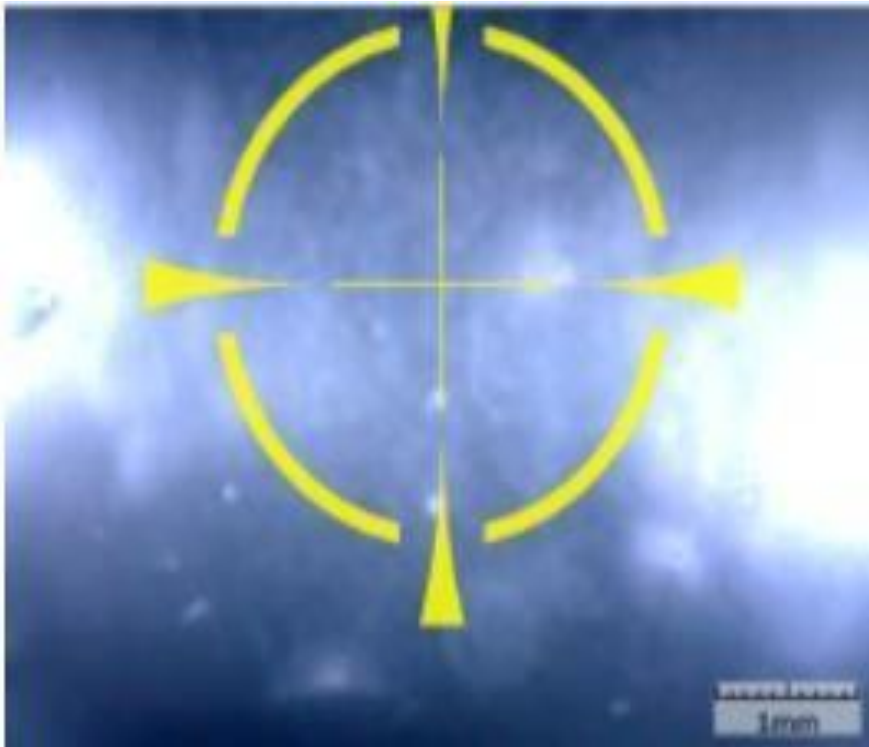
Tabela 10 – Configuração utilizada no software do FRX para célula solar processada mecanicamente - semicondutores.

Voltagem	50 kV
Filtro	Médio
Tempo	100 s

Corrente	200 μ A
Colimador	3 mm
Tempo de processamento	Processo 2
Unidade	wt%
Linha	K α

Fonte: A autora, (2023)

Figura 38 – Imagem das áreas analisadas na célula solar triturada - semicondutores.



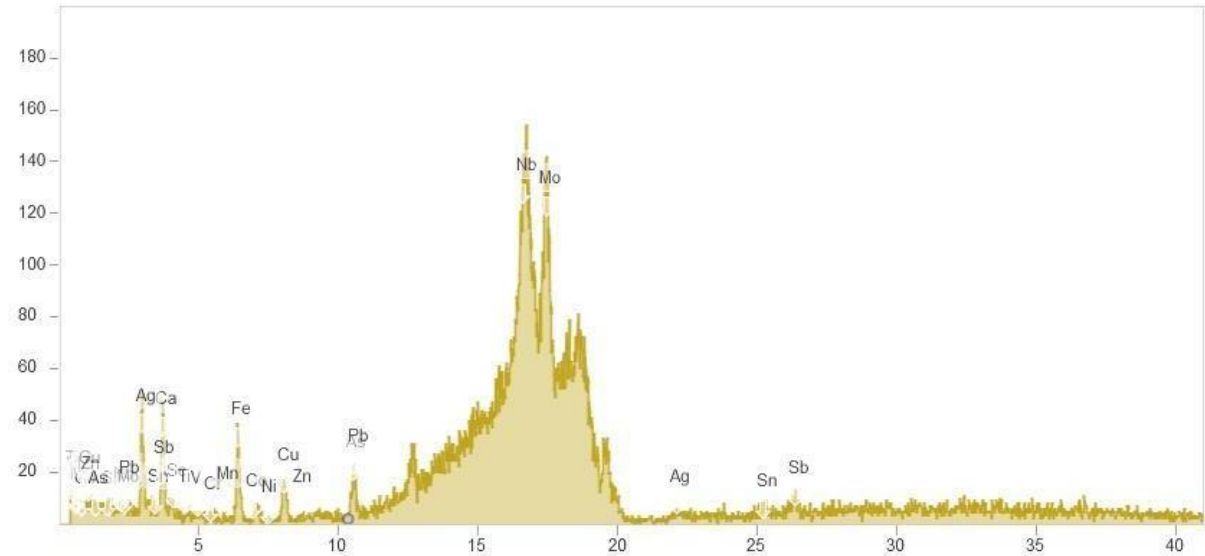
Fonte: A autora, (2023)

Tabela 11 – Composição química por FRX da célula solar processada mecanicamente.						
FRX DA CÉLULA SOLAR - SEMICONDUTORES						
Componentes	Si	Ca	Mo	Nb	Fe	Ti
Percentual %	66.9304	23.0234	3.7218	2.845	1.5948	0.3206
Componentes	Pb	Sn	Ag	Mn	Zn	Co
Percentual %	0.1905	0.0649	0.0738	0.1398	0.0591	0.0459
Componentes	Cr	Sb	Cu	V	Ga	Ni
Percentual %	0.2086	0.1549	0.3003	0.1453	0.0289	0.0244

Componentes	Sc	As	K
Percentual %	0.1238	0.0034	N/D

Fonte: A autora, (2023)

Figura 39 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da célula solar processada mecanicamente - semicondutores.



Fonte: A autora, (2023)

O FRX (Tabela 11) indicou a presença de diferentes metais, os semicondutores presentes na célula solar e de alto valor agregado são o Si-Silício (66.9304%), Mo-Molibdênio (3.72 18%), Nb-Nióbio (2.845) e em menor concentração a Ag-Prata (0.0738%). Si e Al são encontrados na face frontal e inferior da célula solar, como já mencionado. O cálcio provavelmente é residual do vidro, pois na célula solar pura tem-se (0.3474 %) de Ca, conforme quadro 06 do FRX da célula solar pura e conforme Lin *et al.* (2015). Chumbo, estanho e cobre são residuais dos filamentos metálicos, e o estanho também da camada antirreflexiva (Ali *et al.*, 2014). A Ag, também faz parte da pasta de Ag serigrafada na célula solar e nos filamentos metálicos da liga Chumbo-Estanho. Tamarro *et al.* (2016), verificou-se que os painéis de filmes finos analisados que foram fabricados após o ano de 2010 apresentaram alto teor de molibdênio (Sb), ou seja, é um material usado de forma transversal nas tecnologias de fabricação de módulos solares.

Na indústria de semicondutores, esses metais são utilizados na produção de

capacitores eletrolíticos, que são componentes essenciais em dispositivos eletrônicos como smartphones, computadores e tablets. Além disso, é utilizado na produção de supercondutores para aplicações em medicina, transporte e energia.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Brasil, o valor econômico do nióbio é significativo para o país. Em 2020, a produção brasileira de nióbio foi de cerca de 90 mil toneladas, o que gerou uma receita de aproximadamente 2,5 bilhões de dólares para o país. O nióbio é considerado um elemento estratégico para a economia brasileira, já que o país é responsável por cerca de 90% da produção mundial e é considerado um material supercrítico (ABM, 2023; IBRAM, 2023). O antimônio (Sb) é utilizado como retardante de chama em polímeros (Babushok *et al.*, 2017), sendo assim, é um material residual do EVA.

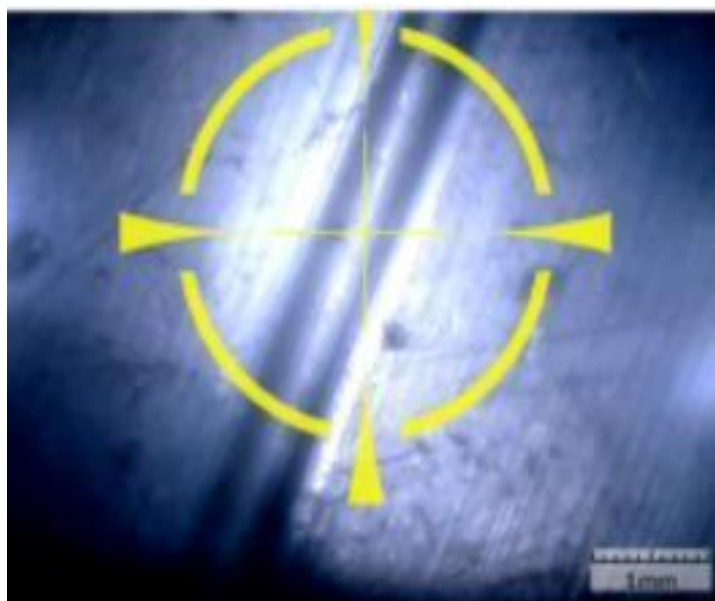
5.4 Caracterização por Fluorescência de Raios – X (FRX) do Alumínio (Moldura)

Tabela 12 – Configuração utilizada no software do FRX para Alumínio.

Voltagem	15 kV
Filtro	Baixo
Tempo	60 s
Corrente	200 μ A
Colimador	3 mm
Tempo de processamento	Processo 2
Unidade	wt%
Linha	K α

Fonte: A autora, (2023)

Figura 40 – Imagem das áreas analisadas na moldura de Alumínio.



Fonte: A autora, (2023)

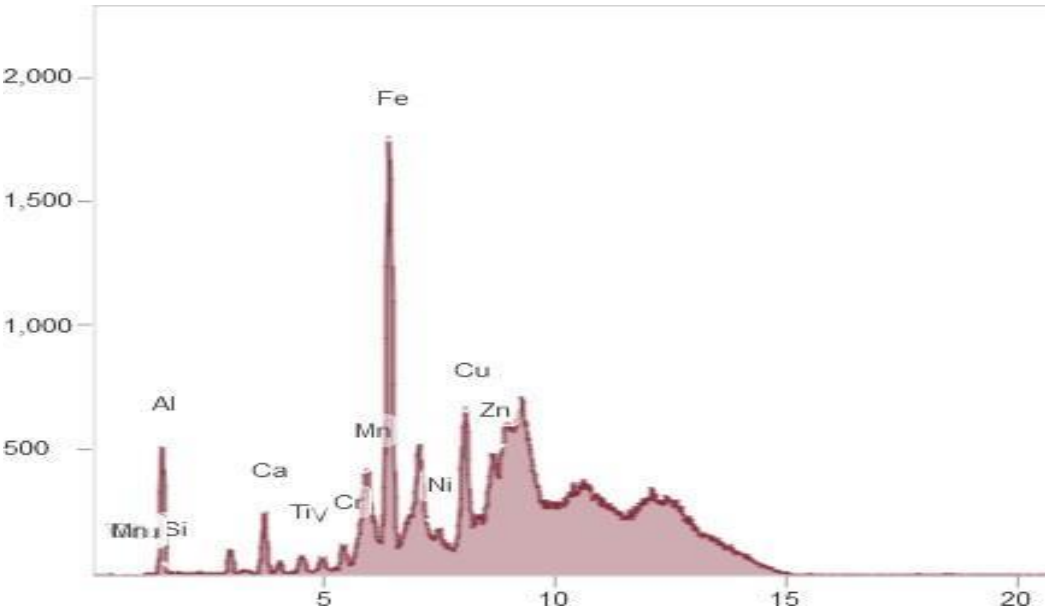
Tabela 13 – Composição química dos elementos presentes na moldura de alumínio.

FRX DO ALUMÍNIO						
Componentes	Al	Si	Fe	Ca	Mn	Cu
Percentual %	92.8943	5.2864	0.6230	0.547	0.1957	0.1509
Componentes	K	Zn	Ti	Cr	V	Ni
Percentual %	0.0440	0.0895	0.0711	0.0451	0.0276	0.0247

Fonte: A autora, (2023)

Na Tabela 13, os resultados do FRX do alumínio (moldura dos módulos fotovoltaicos) são constituídos por alumínio em maior grau (92.8943 %) e silício (5.2864%). Os outros metais como Ferro (Fe) e Ti (Titânio) introduzem maior rigidez ao material. Segundo o site Neofed (2023), no Brasil, a destinação da moldura do módulo fotovoltaico é a fundição e transformação em esquadrias de portas e janelas, voltando a cadeia comercial do segmento de construção civil.

Figura 41 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da moldura de Alumínio.



Fonte: A autora, (2023)

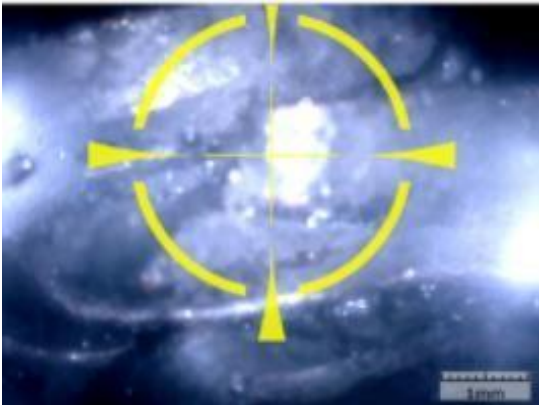
5.5. Caracterização por Fluorescência de Raios-X na Liga Chumbo-Estanho

Tabela 14 – Configuração utilizada no software do FRX Liga Chumbo-Estanho.

Voltagem	50 kV
Filtro	Médio
Tempo	100 s
Corrente	200 µA
Colimador	3 mm
Tempo de processamento	Processo 2
Unidade	wt%
Linha	Kα

Fonte: A autora, (2023)

Figura 42 – Imagem das área analisada na Liga Chumbo-Estanho.



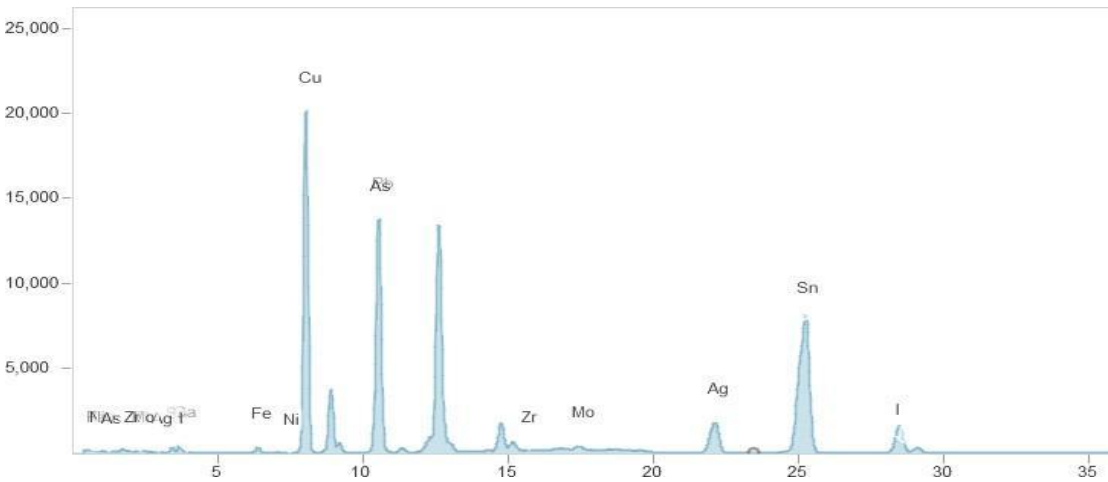
Fonte: A autora, (2023)

Tabela 15 – Composição química obtida por FRX dos elementos presentes na Liga Chumbo-Estanho.

FRX DA LIGA CHUMBO-ESTANHO						
Componentes	Sn	Pb	Cu	Ag	Ca	Fe
Percentual %	31.2283	29.2078	26.8905	5.5446	5.5280	1.0182
Componentes	Mo	Ni	I	As	Zr	
Percentual %	0.5013	0.0488	0.0324	N/D	N/D	

Fonte: A autora, (2023)

Figura 43 – Espectro da Fluorescência de Raios-X da Liga Chumbo-Estanho.



Fonte: A autora, (2023)

Na Tabela 15 - Quantidade em massa dos elementos presentes na Liga Chumbo- Estanho, tem-se elementos químicos importantes como chumbo, estanho, cobre e prata, respectivamente (Pb, Sn, Cu e Ag). Para a indústria fotovoltaica, eles são utilizados com as seguintes funções: O chumbo é utilizado na fabricação de pastas condutoras que são aplicadas nas células solares para coletar a corrente elétrica gerada pela luz solar. O estanho é utilizado como camada de contato na parte superior das células solares, enquanto o cobre é usado como camada de contato na parte inferior. Já a prata é usada como condutor elétrico em algumas células solares. (Fathi *et al*, 2017; Green, 2021; IEA, 2023).

Na Figura 43 - Espectro da Fluorescência de Raios-X da Liga Chumbo-Estanho, o pico do Chumbo(Pb) e Arsênio(As), se sobrepõem. No entanto, de acordo com a Tabela 15, não há arsênio na amostra, e sim Chumbo. Desta forma, a maior concentração do Chumbo está na liga Chumbo-Estanho que se desprende da célula solar e do wafer de EVA durante o processo de moagem industrial. Talvez o uso de técnica de separação por densidade pudesse extrair grande parte da liga Pb-Sn do EVA, menos denso e com isso minimizar de forma considerável a contaminação dos resíduos fotovoltaicos por Chumbo.

5.6 Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X na célula solar pura

Tabela 16 – Composição química dos elementos presentes da célula solar pura.

FRX DA CÉLULA SOLAR PURA					
Componentes	Al	Si	K	Ca	Ag
Percentual %	2,3016	96.5578	0.1809	0.3074	0.6523
Componentes	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Ag ₂ O
Percentual %	2.7331	96.9328	0.0548	0.1024	0.1768

Fonte: A autora, (2023)

Na Tabela 16, a composição da célula solar pura apresenta menor quantidade de elementos químicos e compostos óxidos que a célula solar triturada-processada por método mecânico de separação. O que denota a presença de grande quantidade de contaminantes oriundo de ligas metálicas. Por exemplo, na célula solar triturada, foi encontrada a presença de Molibdênio-Mo (2.485 %), Ferro-Fe (1.584 %), Titânio-Ti (0.3206%), Cobre-Cu (0.3003%), Antimônio-Sb(0.1549%), Manganês-Mn (0.1398%); na célula solar pura não foi identificado nenhum desses componentes.

Em relação a prata, na célula solar processada mecanicamente pela reciclagem industrial o percentual foi de (0.0738%), na célula solar pura foi de (0.6523%). amplamente utilizado em circuitos de contato devido às suas propriedades físicas excepcionais e resistência à corrosão (Grandell & Thorenz, 2014). Geralmente, a prata é encontrada em quantidades limitadas e frequentemente é um subproduto de outros minerais na natureza, sendo raramente encontrada no Brasil. No contexto dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino, houve uma redução significativa no uso de prata, passando de 400 mg para 130 mg entre 2007 e 2016. A meta é reduzir ainda mais para aproximadamente 65 mg até 2028, visando diminuir a largura da banda de metal e a área do barramento nas células solares. No entanto, a prata ainda é essencial como condutor nas células solares, e não se espera que seja substituída na próxima década.

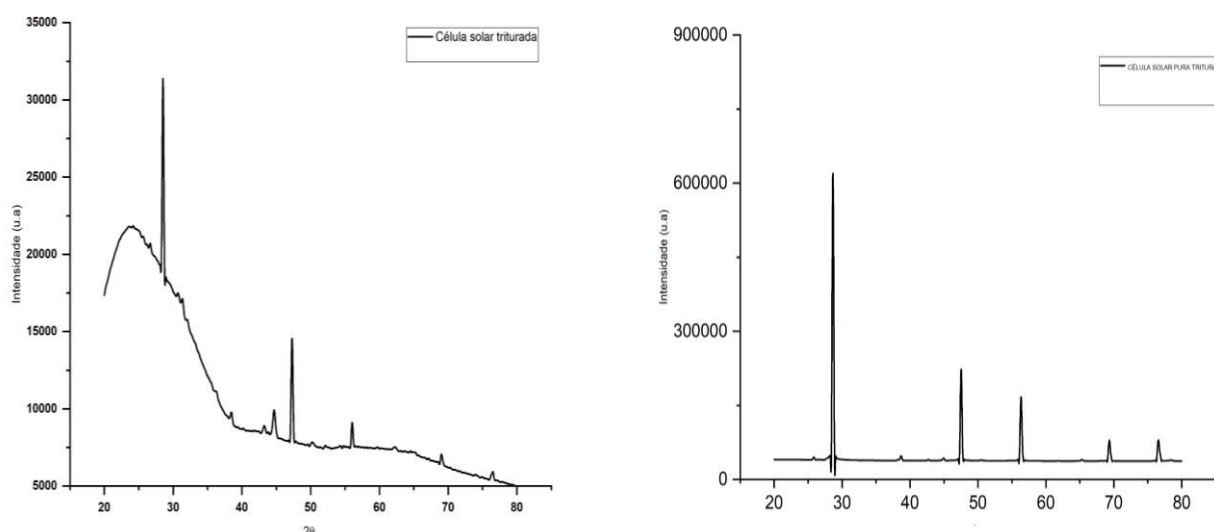
Considerando a pequena porcentagem de prata nos módulos fotovoltaicos (cerca de 0,05%) e as previsões de descarte de milhões de toneladas desses módulos até 2050, estima-se que haja uma quantidade significativa de prata, entre 37.800 a 49.140 toneladas, que podem ser descartadas se não forem recuperadas. Portanto, a recuperação da prata dos resíduos de módulos fotovoltaicos é crucial, e existem diversas tecnologias disponíveis para esse fim (Dias *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2019; Farrell *et al.*, 2020).

5.7 Caracterização por Difração de Raios-X (Difratograma de Raios- X) a) célula solar triturada no processo de reciclagem b) célula solar pura

Figura 44 – Difratograma de Raios-X.

a) célula solar triturada na indústria de reciclagem.

b) Célula solar pura.



Fonte: A autora (2023)

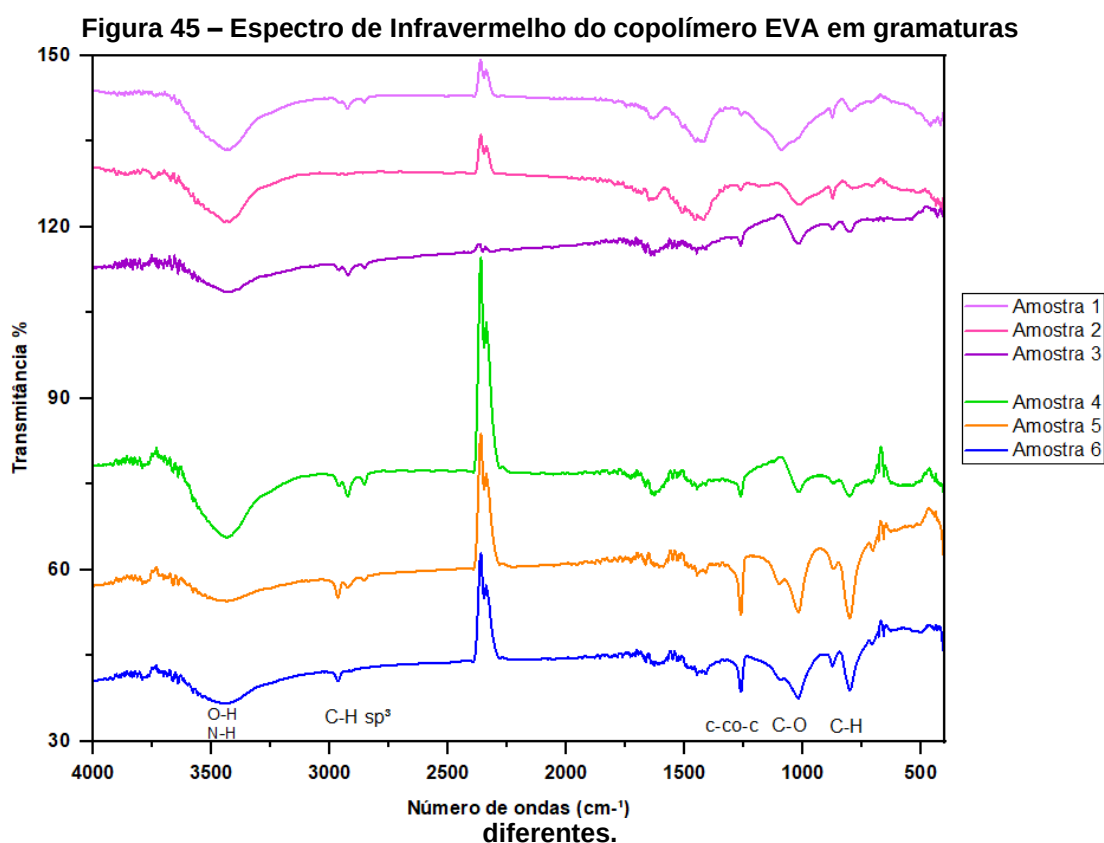
Na Tabela 16 - Quantidade em massa dos elementos presentes na célula solar pura, além do silício (Si) grau solar, a prata (Ag) é outro material supercrítico, ou seja, de grande demanda mundial, não só na indústria fotovoltaica e que pode ser reaproveitado.

No Difratograma da célula solar, Figura 44 (a) e (b), o pico de maior intensidade é característico do Si metálico, como observado por Chen *et al* (2019). Essa mesma fase aparece nos outros dois maiores picos. A estrutura do material é cúbica (Straumanis *et al.*, 2002). Observa-se ainda que na Figura 44 (a), a célula solar apresenta estrutura amorfa, provavelmente devido a contaminação por outros materiais, o que não ocorre na figura 56 (b), onde tem-se uma estrutura cristalina bem definida, da célula solar pura.

Um fator importante a ser considerado nesta análise é que a Liga Pb-Sn, mesmo fazendo parte da estrutura que conecta uma célula solar a outra, devido a necessidade da amostra estar em estado poroso, a liga não foi incluída na amostra.

Por essa razão, como mostra a Tabela 16, não há presença de Chumbo ou Estanho no material.

5.8 Caracterização por Espectroscopia de Infravermelho (FTIR) do Copolímero EVA em gramaturas diferentes



Fonte: A autora, (2023)

Os espectros de absorção no Infravermelho do copolímero de EVA, apresentado na figura 57, mostra algumas bandas importantes, observam-se as bandas em 2977 e 2878 cm⁻¹, que resultam da deformação axial C-H dos grupos metílicos (-CH₃) do Acetado de Vinila. Além disso, as bandas em 1389 e 1363 cm⁻¹ indicam a presença dos grupos isopropil (-CH(CH₃)₂). A absorção em 1059 cm⁻¹ é devido à vibração de deformação axial do Acetato de vinila (>CH-O-CH<).

Tabela 17 – Bandas de absorção características dos grupos de EVA - FTIR.

Comprimento de onda da banda cm ⁻¹	Atribuição
1737	-COO-
1465	CH ₂
1371	CH ₃
1242 - 1021	C-O-C
722	CH ₂

Fonte: Elaborado a partir de Oliveira *et.al.*, 2016

De acordo com Oliveira *et al.*, (2016), o espectro de absorção característico do EVA é caracterizado pela Tabela 17 que se assemelha a algumas bandas o espectro da figura 45. Foram observadas as mesmas bandas de absorção características dos grupos presentes no EVA em estudos anteriores realizados por Carvalho (2011), Liu e colaboradores (2011) e Jin e seus colaboradores (2010). A banda em 1737 cm⁻¹ é atribuída à vibração de estiramento do grupo carbonila éster, enquanto as bandas em 1242 cm⁻¹ e 1021 cm⁻¹ são relacionadas à vibração de estiramento assimétrico de C-O-C, conforme descrito por Carvalho (2011).

Além disso, outras bandas de absorção, como 1465 cm⁻¹ (relacionada à quebra da vibração de -CH₂-), 1371 cm⁻¹ (dobramento simétrico de C-H da vibração de -CH₃) e 722 cm⁻¹ (modo rocking interno característico da vibração de -CH₂) também foram observadas, indicando a quebra de segmentos da cadeia do poliacetato de vinila. É interessante notar que as amostras de gramaturas 1,2 e 3 apresentam características semelhantes, enquanto as amostras de gramaturas 5, 6 e 7 com partículas maiores e provavelmente uma maior concentração de EVA, apresentam estruturas similares.

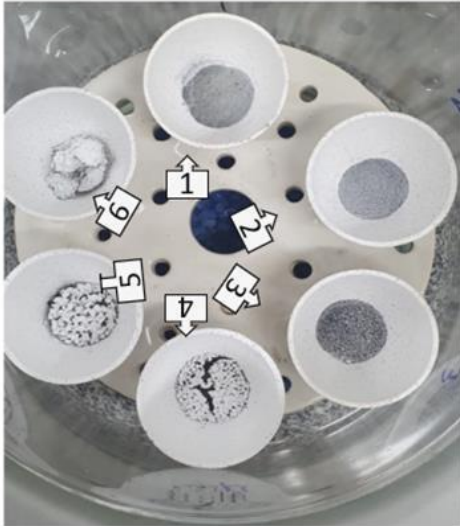
5.9 Resultados da perda de massa|estabilidade térmica do Copolímero EVA - Mufla.

Tabela 18 – Resultados das amostras em gramaturas distintas

Peneiras	Peneira 1	Peneira 2	Peneira 3	Peneira 4	Peneira 5	Peneira 6
Mesh	150 µm	200 µm	425 µm	75 mm	1,18 mm	19 mm
Malha	100 - 111	70,9 – 79,1	409 - 441	72 - 77	1,14 - 1,22	18,42 - 19,58
%Perda de massa	+0,03	-0,07	-0,38	-1,80	-1,85	-0,85

Fonte: A autora, (2023)

Figura 46 – Amostras pós-mufla.



Fonte: A autora, (2023)

Ao analisar as amostras de copolímero EVA, ver figura 58, em temperatura de até 900°C, nota-se que nas amostras da peneira 4 (-1,80%) e 5 (-1,85), ver Tabela 18, tiveram uma maior perda de massa no processo de combustão. A amostra da peneira 6, em tamanho maior apresentou uma melhor estabilidade térmica que as amostras da peneiras 5 e 6. A amostras das peneiras 1 e 2 e 3 tiveram menor perda de massa,

talvez pelo fato de apresentarem menor quantidade de polímeros e maior quantidade de metais semicondutores. É interessante notar que a amostra da peneira 1, considerando margem de erro, manteve a estabilidade, não havendo perdas ou ganhos de massa no processo. Considerando que o ponto de fusão do EVA varia de acordo com a sua composição química e grau de polimerização. Em geral, o EVA apresenta um ponto de fusão relativamente baixo, entre 70°C e 100°C. No entanto, esse valor pode variar dependendo das características específicas do material. É importante destacar que o EVA é um termoplástico, o que significa que ele pode ser moldado e remoldado a altas temperaturas, sem perder suas propriedades mecânicas. Considerando ainda a presença de materiais anti chamas adicionados ao backsheet como o Tedlar, material antichamas. (Chen *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2011).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da caracterização indicam que o vidro reciclado contém altas concentrações de silício e cálcio, naturais de sua composição, bem como o elementos químicos presente nas células solares. Embora a presença de metais como chumbo, cobre e zinco possa ser preocupante, esses materiais podem ser reaproveitados na indústria de semicondutores e em outras aplicações. Na indústria fotovoltaica, a liga chumbo-estanho é usada na fabricação de pastas condutoras e como camadas de contato nas células solares. O nióbio também é um elemento importante na economia mundial e brasileira, é usado na produção de supercondutores para várias aplicações.

A análise de FTIR, no EVA, que além do processo mecânico de separação industrial também foi submetido em laboratório a diminuição de suas partículas, através de moinho de facas e peneiramento em 6 gramaturas diferentes, apresentou resultados interessantes, pois quanto menor a partículas, menor a concentração de EVA ou percentual de matéria orgânica. Tal fato, pode contribuir significativamente para um processo adicional, mesmo mecânico de uma melhor separação ou pureza dos materiais.

A análise de DRX da célula solar indica a presença de silício metálico, molibdênio, Nióbio e Prata, enquanto os resultados de FRX do copolímero EVA mostra a presença de resíduos dos semicondutores das células solares e vidro presentes no EVA. As amostras de tamanhos diferentes apresentam características semelhantes, mas as amostras em gramaturas maiores têm uma maior concentração de EVA. Essa informação é relevante para a indústria, uma vez que permite uma melhor compreensão das propriedades e comportamentos do material em diferentes dimensões.

Finalmente, é fundamental continuar investindo em pesquisas e estudos nessa área, visando não apenas o reaproveitamento adequado dos resíduos fotovoltaicos, mas também o desenvolvimento de novas tecnologias que possam contribuir a adequada separação dos materiais e reinserção na cadeia produtiva objetivando avanços na economia circular e sustentabilidade global.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões de trabalhos futuros na linha de pesquisa sobre reciclagem de materiais fotovoltaicos, caracterização, métodos de separação e produção de novos materiais mais sustentáveis são:

1. Desenvolvimento de métodos eficientes e economicamente viáveis para a separação de materiais fotovoltaicos ou supercríticos prata, nióbio, e molibdênio.
2. Estudo da viabilidade da recuperação de materiais a partir de células solares danificadas ou descartadas, para reduzir a quantidade de resíduos eletrônicos classificados como resíduos perigosos classe I.
3. Investigação de novos materiais mais sustentáveis para uso em células solares, como materiais orgânicos ou perovskitas.
4. Avaliação do impacto ambiental da produção e reciclagem de células solares, levando em consideração o ciclo de vida completo do produto.
5. Desenvolvimento de tecnologias para a produção de células solares mais eficientes e duráveis, que possam ser recicladas com mais facilidade e menor impacto ambiental.
6. Análise da viabilidade econômica da reciclagem de células solares, logística reversa e desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a adoção de práticas sustentáveis na indústria solar.

Há muitas oportunidades para avanços significativos nessa área, com o crescente interesse em fontes renováveis de energia e a necessidade cada vez maior de práticas sustentáveis na indústria.

REFERÊNCIAS

ABM. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**. Disponível em: www.abmbrasil.com.br. Acesso em: 15 ago. 2023.

ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL; BANCO AFRICANO DE DESENVOLVIMENTO. **Africa's Energy Transition: A Roadmap for a Renewable Energy Future**. Abu Dhabi: Agência Internacional de Energia Renovável e Banco Africano de Desenvolvimento, 2022.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2021). **Potencial de geração distribuída no Brasil**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/0/Potencial+de+Gera%C3%A7%C3%A3o+Distribu%C3%ADa+no+Brasil/8c9f5e9e-6c77-4e6a-a1b1-7a5c2d9b9e57>

ANNEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD)**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/programa-de-desenvolvimento-da-geracao-distribuida-de-energia-eletrica-progd>. Acesso em: 15 ago. 2021. Acesso em : 16 sep. 2023.

ARDENTE, Fulvio; LATUNUSSA, Cynthia E.L.; BLENGINI, Gian Andrea. **Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Waste Management**, v. 91, p. 156-167, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.059>..

AUO. **Sustainable Development**. Acessado em 29 de maio de 2022, de <https://auo.com/en-global/Sustainability/index.html>. 2021

Australian Government Department of the Environment and Energy. **National Television and Computer Recycling Scheme**. Disponível em: <https://www.environment.gov.au/protection/waste-resource-recovery/national-television-and-computer-recycling-scheme>. Acesso em: 20 ago. 2023.

AYELE, D. W., & KIM, K. J. **Investigation of the effect of glass type on the performance and degradation of photovoltaic modules: A review**. Solar Energy Materials and Solar Cells, 208, 110401.2020.

BABARINDE, F.; ADIO, M. **A Review of Carbon Capture and Sequestration Technology**. Journal of Energy Technology and Environment, p. 1-11, 2020. Disponível em: DOI:10.37933/nipes.e/2.2020.1. Acesso em: 24 de junho de 2022.

BATTISTI, R., & CONRADO, V. **Photovoltaic waste: a review of recycling and processing technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9(5), 469-

504.2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. **Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho**. 2. ed. Rio de Janeiro: INCA, 2019. 80 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_vigilancia_cancer_relacionado_2ed.pdf. Acesso em: 18 set. 2023.

BERGER, M. et al. **Recycling of thin-film photovoltaic modules: A review**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 120, p. 433-443, 2014.

BESIOU, M.; VAN WASSENHOVE, L.N. **Sustainable e-waste management: towards an economic incentive-based approach**. Journal of Industrial Ecology, v. 20, n. 2, p. 387–395, 2016.

BIRAT, J. P. **Recycling of photovoltaic panels**. Comptes Rendus Physique, 16(3), 262- 269.2015

BORGESE, L., CUCCHIELL, FGASTALDI, M., LENNY Koh, S. C., & ROSA, P. **Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling**. Journal of Cleaner Production, 236, 117626. 2019

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 20 ago. 2023.

BRITTAIN HG. **Polymorphism in Pharmaceutical Solids**: Second edition. Vol. 192, Polymorphism in Pharmaceutical Solids: Second Edition. 2016. 1–640 p.

BURILLE, Felipe. **Caracterização de tecidos mamários caninos normais e neoplásicos combinando técnicas de micro-fluorescência e espalhamento de Raios X**. 2020. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

CAMARGO. Priscila Silva Silveira. **Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos de Silício Cristalino**.pdf .Disponível em < [Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino: separação e concentração de materiais \(ufrgs.br\)](#). 2021

CARNEIRO, J. **Módulos fotovoltaicos: Características e associações**. Universidade do Minho, 2010.

CARVALHO, Eliana FA; CALVETE, Mário José F. **Energia Solar: Um passado, um presente... um futuro auspicioso**. Revista Virtual de Química, v. 2, n. 3, p. 192-203, 2010.v.2,n.3. Acesso em: 17 sep. 2023.

CARVALHO, Igor Alessandro Silva. **Estabilização contra fotodegradação do copolímero EVA por adição de nanopartículas de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ /quartzo irradiado com raios gama para uso fotovoltaico**. 2011. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede

Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT) UFOP – CETEC – UEMG. 2011

Carvalho, P. M. S. **Modelação e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2013.

CEM. **Critical Minerals: Managing Risks and Opportunities**. Canberra: Commonwealth of Australia. 2020

CHEN, C.-H.; CHEN, C.-C.; CHEN, C.-H.; et al. **Effects of Ethylene Vinyl Acetate Content on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells**. International Journal of Photoenergy, v. 2014, p. 1-6, 2014.

CHINA. **Regulation on the Management of Solid Waste**. Disponível em: https://www.chinadaily.com.cn/china/2019-09/01/content_37570023.htm. Acesso em: 20 ago. 2023.

CHOI, J. K., & FTHENAKIS, V. M. **E-waste recycling: where does it go from here?**. *Environmental Science & Technology* 48(16) 8735-8741 2014

CHOI, J. W. et al. **An analysis of the effects of fluorine-doped tin oxide (FTO) films on the performance of dye-sensitized solar cells**. Materials, v. 13, n. 10, 2017. doi: 10.3390/ma13102182.

CHOWDHURY, M.A.K.; KUMAR, S.; DAS, S.; RAHMAN, M.M.; ISLAM, M.R.; CHOWDHURY, M.A.H.; MIAH, M.A.J.; ISLAM, M.N.; HOSSAIN, M.M. **An Overview of Solar Panel Recycling in the Context of Bangladesh**. Journal of Renewable Materials, v. 8, n. 3, p. 313–326, 2020.

COMISSÃO EUROPEIA. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability**. Brussels: European Commission. 2020

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008. **Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela administração pública federal direta e indireta e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 nov. 2008. Seção 1, p. 81-83.

DERA. **Mineral Commodity Summaries 2021**. Reston: U.S. Geological Survey. 2021

DEUTSCHE SOLAR GMBH. Disponível em: <<https://www.deutsche-solar.com/>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

DIAS, F. C. **Introdução à energia solar fotovoltaica**. São Paulo: Editora Érica, 2015. DOI: 10.2788/786252.

DUARTE, M. A. **Planejamento energético e meio ambiente: conceitos básicos**. São Paulo: Blucher. 2005.

ELY, R. J.; SWART, J. W. **Energia Solar Fotovoltaica de Terceira Geração**. IEEE Potentials, v. 33, n. 2, p. 29-32, mar./abr. 2014. Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-foto-voltaica-terceira-geracao.pdf>. Acesso em: nov. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Plano Nacional de Energia 2050: Horizonte 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. 128 p. Disponível em:

EPE. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/0/Potencial+de+Gera%C3%A7%C3%A3o+Distribu%C3%ADa+no+Brasil/8c9f5e9e-6c77-4e6a-a1b1-7a5c2d9b9e57>>. Acesso em: 16 sep. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Atlas-Solarimetrico-do-Brasil>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ESMAP. **Global Photovoltaic Power Potential by Country**. Washington, DC: World Bank, 2020.

FARQUHARSON, M. J. et al. **Micro-XRF studies of trace element distributions in biological systems**. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, v. 63, n. 3, p. 233-240, 2008.

FATHI, M.; MOHAMMADI, M.; RAHIMI, N.; et al. **A Review on Materials and Methods to Produce Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 1331-1352, 2017.

FIRST SOLAR. **End-of-Life Panel Recycling**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.firstsolar.com/sustainability/end-of-life-panel-recycling>. Acesso em: 29 maio 2022.

FIRST SOLAR. **Patent Application Publication. Method for Recycling Photovoltaic Devices**. US20100155051A1, 2010.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics Recycling**. 2021 Acessado em 29 de maio de 2022, de <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-topics/photovoltaics/recycling.html>.

GCL-POLY ENERGY HOLDINGS LIMITED. **Patent Application Publication. Recyclable Solar Panel and Method for Recycling Solar Panel**. US20160221518A1, 2016.

GCL-POLY ENERGY HOLDINGS LIMITED. **Patent Application Publication**.

Recyclable Solar Panel and Method for Recycling Solar Panel. US20160221518A1, 2016.

GERBINET, S.; REENAERS, P.; MATHIEUX, F. **Life cycle assessment of the recycling of photovoltaic modules.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 30, p. 917- 925, 2014.

GERBINET, S.; REENAERS, P.; MATHIEUX, F. **Life cycle assessment of the recycling of photovoltaic modules.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 30, p. 917- 925, 2014.

GLOBAL ALLIANCE FOR SUSTAINABILITY - GASE. **Alliance News.** Disponível em: <https://sustainable-energy.eco/alliance-news.html>. Acesso em: 18 set. 2023.

GRANATA, G. et al. **Recycling of photovoltaic panels by physical operations.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 123, n. 2014, p. 239–248, 2014.

GREEN, M. A. **Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion.** Springer Science & Business Media, 2006.

GREEN, M. A.; EMERY, K. **Solar cells: operating principles, technology, and system applications.** Prentice Hall, 2010.

GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. D. **Solar cell efficiency** tables (version 47). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 29, n. 5, p. 407-414, 2021.

GUMA, T. N. et al. **X-ray Diffraction Analysis of the Microscopies of Some Corrosion Protective Bitumen Coatings.** Int. J. Mod. Eng. Res., v. 2, p. 4387-4395, 2012.

GURZHIY, V. V.; KALUGIN, O. N. **Scandium: Its Occurrence, Properties, and Applications.** Journal of Applied Spectroscopy, v. 82, n. 5, p. 757-771, 2015.

GUSTAFSSON, M. et al. **Recycling of CIGS solar cells: Life cycle assessment and criticality considerations.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 130, p. 254-264, 2014.

HAGFELDT, A.; GRÄTZEL, M. **Molecular photovoltaics.** Accounts of Chemical Research, v. 33, n. 5, p. 269-277, 2000.

HANCOCK, B. C.; ZOGRIFI, G. **Characteristics and Significance of the Amorphous State in Pharmaceutical Systems.** J Pharm Sci., v. 86, n. 1, 1997.

HUYSMAN, S.; DE MEYER, A.; DEWULF, W. **Environmental assessment of photovoltaic electricity generation in Belgian residential buildings.** Energy and Buildings, v. 92, p. 75-83, 2015.

IABS. **Energia sociocircular: uma introdução à cadeia de resíduos fotovoltaicos.** [S.l.: s.n.], set. 2021.

IBAMA. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Governo Federal, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>. Acesso em: 18 set. 2023.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris: International Energy Agency, 2020.

IEA-PVPS. **About Us**. Disponível em: <https://iea-pvps.org/about-us/>. Acesso em: 29 maio 2022.

ÍNDIA. **Solid Waste Management Rules**, 2016. Disponível em: <https://swachhbharatmission.gov.in/sbmcms/writereaddata/images/pdf/swm-rules-2016.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 6ª edição. 201

INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP. **Copper Mine Production by Country: Top 20 Countries in 2020**. ICSG, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy**. Paris: IEA, 2010. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy>. Acesso em: 16 set. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS). **Status of PV module recycling in selected IEA PVPS Task 12 countries**. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS). **Status of PV module recycling in selected IEA PVPS Task 12 countries**. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050**. 4ª revisão, outubro de 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 16 set. 2023.

IPCC. Sumário para formuladores de políticas. In: **MUDANÇAS CLIMÁTICAS 2023: A BASE DA FÍSICA**. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. [s.l.]: IPCC, 2023. p. 1-15. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf. Acesso em: 28 ago. 2023.

IPCC. **WGII AR5: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Summary for Policymakers**, 2014.

IRENA. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016.

IRENA. **Renewable power generation cost report 2018**. Abu Dhabi: IRENA, 2019. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>>. Acesso em: 16 set. 2023.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2022**. International Renewable Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>. Acesso em: 18 set. 2023.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2022**. International Renewable Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>. Acesso em: 18 set. 2023.

IRENA. **Renewable Energy Statistics 2021**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>>. Acesso em: 16 set. 2023.

IRENA. **Renewable power generation cost report 2018**. <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>. Acesso em 20 de ago.23

JÄGER-WALDAU, A. **Photovoltaics Report**. Joint Research Centre (JRC) of the European Commission, 2017.

JAPÃO. **Law for the Promotion of Effective Utilization of Resources**. Disponível em: <https://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/attach/law.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

KANG, S. et al. **Recycling of silicon from photovoltaic panel waste via hydrometallurgical and pyrometallurgical processes**. Journal of Hazardous Materials, v. 320, 2016, pp. 342-348.

KANG, S.W. et al. **Recycling of waste solar cells: Recovering silicon and purifying silicon carbide from slurry waste generated in slicing processes of silicon ingots**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 104, 2012, pp. 137–141.

KAO, K. J. et al. **High-performance thin-film silicon solar cells with transparent conducting oxides (TCO) using the PECVD-grown ZnO:Al and the sputtered SnO₂:F as front and back contacts**. Thin Solid Films, v. 518, n. 20, 2010, pp. 5621-5624. doi: 10.1016/j.tsf.2009.12.130.

KHATIB, T.; MOHAMED, A. **Solar panel maintenance and cleaning**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, 2017, pp. 1255-1267.

KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K. **A review of photovoltaic systems size**

optimization techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 22, jun. 2013, pp. 454–465.

KHATIB, T.; SOPIAN, K. **A review of the recent advances in solar photovoltaic systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 107, 2019, pp. 484-496.

KHATIB, T.; SOPIAN, K. **Hot spot analysis in photovoltaic modules: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 102, 2019, pp. 1-14.

KIM, D.; KIM, J.-H.; KIM, S.; et al. **Enhanced Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells with EVA Encapsulant by Incorporating ZnO Nanoparticles in EVA Layer.** Journal of Nanomaterials, v. 2015, 2015, pp. 1-9.

KIM, J. H.; KIM, D. Y. **Review of the recent research on the photovoltaic module encapsulation materials.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 71, 2019, pp. 12-25.

KLEMETTI, Erika. **The Copper Industry Has A Massive Problem With Wasted Spending.** Forbes, 2019. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/erikaklemetti/2019/07/03/the-copper-industry-has-a-massive-problem-with-wasted-spending/?sh=7f8c2d7c6d5f>. Acesso em: 10 ago. 2021.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, E.; OSTROWSKI, R. **Recycling of Photovoltaic Cells – State of the Art and Future Challenges.** Archives of Metallurgy and Materials, v. 55, n. 4, 2010, pp. 1263–1270.

KRENZINGER, A. **Notas de aula da disciplina de Conversão Fotovoltaica da Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com o Laboratório de Energia Solar (LabSol), 2019.**

LATUNUSSA, C. et al. **Análise da recuperação de materiais de painéis fotovoltaicos.** EUR 27797. Luxemburgo (Luxemburgo): Publications Office of the European Union; 2016.

LAZARD. **Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage.** 2018. Disponível em: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018>. Acesso em: 16 set. 2023.

LEE, S.; KIM, D. Y. **Revisão sobre a melhoria do desempenho de módulos fotovoltaicos usando materiais avançados de encapsulamento.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 71, 2019, p. 1-11.

LEPRE, PRISCILA RAMALHO. **Economia Circular Inclusiva: a inclusão social como atributo sistêmico do Design para a Economia Circular em contextos econômicos emergentes.** Estudos em Design, v. 30, n. 3, 2022.

LI, G.; ZHU, R.; YANG, Y. **Polymer solar cells.** *Nature Photonics*, v. 6, n. 3, 2012, p. 153-161.

LIU, Z.; JIN, J.; CHEN, SHUANGJUN, C.; ZHANG, J. **Effect of crystal form and particle size of titanium dioxide** on VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belo Horizonte, 04 a 07 de abril de 2016 the photodegradation behavior of ethylene-vinyl acetate copolymer/low density polyethylene composite. *Polymer Degradation and Stability*, n.96, p. 43-50, 2010

LIMA, E. C.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, R. C. **Thin-film solar cells: review and perspectives.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 6, n. 2, 2017, p. 107- 123.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.** Wiley, 2011.

MALEZAN, L. et al. **Synchrotron radiation micro-XRF: an overview of applications for biological samples.** *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 33, n. 1, 2018, p. 37-57.

MASSON, G. et al. **Photovoltaic capacity and generation in the world: Current status and outlook.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 99, 2019, p. 271-284.

MASSON, G. et al. **Photovoltaic capacity and generation in the world: Current status and outlook.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 119, 2020, p. 109569.

MASSON, G. et al. **Relatório de Status Global para Edifícios e Construção.** 2019. Disponível em: <https://globalabc.org/media/Global-Status-Report-2019.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

MASSON, J. F.; SIMON, J.; GAGNÉ-LANDRY, M. **Photovoltaic solar energy: Review of current status and future prospects.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 123, 2020, p. 109769.

MEDEIROS, Maria Thalita Siqueira de. *Investigação dos efeitos radiolíticos no Poli (etileno-coacetato de vinila) (EVA).* Recife: O Autor, 2016. 84 f. : il., tabs.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/documents/36208/0/Atlas+Brasileiro+de+Energia+Solar/6a2c6f8c-c2c9-4a54-8aaf-8b86f4f8e1e4>. Acesso em: 16 set. 2023.

MITCHELL, R. **The race to mine critical minerals: can we meet the demand for renewable energy?** *The Guardian*, 2021. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2021/jul/18/the-race-to-mine-critical-minerals-can-we-meet-the-demand-for-renewable-energy>. Acesso em: 16 set. 2023.

MOBILIO, S.; BOSCHERINI, F.; MENEHINI, C. **Synchrotron radiation: Basics, methods and applications**. Springer Science & Business Media, 2015.

MORAES, Bruno C.; ORTIZ, José A. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2013.

MURRAY, C. E. et al. **Nanoscale Strain Characterization in Microelectronic Materials Using X-ray Diffraction**. Powder Diffraction, v. 25, 2010, p. 108-113.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Air Pollution 101**. YouTube, outubro de 2017b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e6rglsLy1Ys&t=16s>. Acesso em: 24 jun. 2022.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Causes and Effects of Climate Change**. YouTube, agosto de 2017a. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=G4H1N_yXBIA. Acesso em: 24 jun. 2022.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). **Scandium and Scandium Compounds**. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng1036.html>. Acesso em: 16 set. 2023.

NELSON, J. **A física das células solares**. Vol. 1. Imprensa do Imperial College, 2003.

NEOFED. **Empresa brasileira quer capturar as placas de energia solar que viram lixo**. Disponível em: <https://neofeed.com.br/inovacao/empresa-brasileira-quer-capturar-as-placas-de-energia-solar-que-viram-lixo/>. Acesso em: 23 set. 2023.

NEOSOLAR. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br>. Acesso em: 18 set. 2023.

NREL. **Solar Photovoltaic Technology Basics**. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/solar-cell-technology-basics.html>. Acesso em 22 set. 2021.

DE OLIVEIRA, Michele Cândida Carvalho et al. **Caracterização da degradação do Encapsulante copolímero de EVA de Módulos Fotovoltaicos Instalados em zonas climáticas de Minas Gerais por FTIR-ATR**. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2016. p. 1-7.

ONU. **Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Descarte**. 2016. Disponível em: <https://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-e.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Omazic, A.; Oreski, G.; Halwachs, M.; Eder, G.C.; Hirschl, C.; Neumaier, L.; Pinter, G.; Erceg, M. **Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review**. Solar Energy Materials and Solar Cells. v. 192, p. 123–133, 2019.

PADOAN, F.C.S.M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. **Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development.** Solar Energy, v. 177, 2019, p. 746-761.

PALITZSCH, K.; LOSER, R. **Recycling of solar modules – an overview on available technologies and economic viability.** Renewable Energy, v. 39, n. 1, p. 1–5, 2012.

PARK, N.G. **Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology.** Materials Today, v. 18, n. 2, 2015, p. 65-72.

PEETERS, J.R.; ALTAMIRANO, D.; DEWULF, W.; DUFOU, J.R. **Forecasting the composition of emerging waste streams with sensitivity analysis: A case study for photovoltaic (PV) panels in Flanders.** Resources, Conservation and Recycling, v. 120, 2017, p. 14-26.

PEETERS, J.R.; MUISENER, P.; VAN DER VORST, G. **A comprehensive approach to the recycling of photovoltaic panels.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 70, 2017, p. 952-961.

PENG, H.; CHEN, H.; CHEN, Z. **Life cycle assessment of solar photovoltaic systems: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 26, 2013, p. 718-727.

PEREIRA, E. B. et al (Coord). **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 19/09/2020.

PEREIRA, E.B. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, tecnologias e aplicações.** São Paulo: Ed. Erica, 2017.

PEREIRA, E.B. et al. (Coord.). **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 19 set. 2020.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: situação atual e perspectivas futuras.** Revista Brás.

PINHO, L.; GALDINO, M.A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações.** Editora Interciência, 2014.

PISTILLI, M. D. **Copper Recycling and Sustainability.** In: **Handbook of Sustainability Science and Research.** Springer International Publishing, 2021.

POLMAN, A. et al. **Science**, 2016, 352, 307.

PRADO, P.F.A. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2018.

PV CYCLE. **Our Mission.** Disponível em: <https://www.pvcycle.org/our-mission/>.

Acesso em: 29 mai. 2022.

RADZIEMSKA, E.; HEIMANN, R. B.; HEUMANN, S. **Recycling of photovoltaic waste**. Waste Management, v. 45, p. 91-98, 2015.

RAPHAEL, E. et al. **Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente**. Química Nova, 2017.

RECYCLIA. **¿Qué es Recyclia?** Disponível em: <https://www.recyclia.es/que-es-recyclia/>. Acesso em: 29 mai. 2022.

REN, Y.; XIE, Y.; GAO, W. **A review of the reliability of photovoltaic systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 107, p. 446-457, 2019.

REN21 SECRETARIAT. **Renewables 2021 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2021.

RESOLVED. **Project: Recovery of Solar Valuable Materials, Enrichment and Decontamination**. Disponível em: <http://www.resolved-project.eu/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SALVEGO, D. et al. **Evaluation of the distribution of trace elements in human liver cirrhosis tissue by synchrotron radiation micro-X-ray fluorescence analysis**. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, v. 153, p. 11-17, 2019.

SANTOS, F. A. et al. **Comparative study of encapsulation techniques for photovoltaic modules: EVA vs. PVB**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 182, p. 204-211, 2018. doi: 10.1016/j.solmat.2018.02.009.

SAPERATEC. **Technology**. Disponível em: <https://www.saperatec.com/technology/>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SARKER, Shuronjit Kumar et al. **Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 3, p. 107622, 2022.

SCHNEIDER, L. et al. **Life cycle assessment of photovoltaic systems: Results of Austrian and German case studies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 60, p. 1115-1126, 2016.

SCRELEC. **PV Recycling**. Disponível em: <https://www.screlec.fr/pv-recycling/>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SERRANO-LUJAN, L.; MARTINEZ-DOMINGO, C. **Influence of the encapsulant composition on the performance of photovoltaic modules**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 113, p. 109275, 2019.

SFEZ, S.; RENTSCH, L.; HISCHIER, R. **Life cycle assessment of solar module recycling process using a multi-regional input-output approach**. Journal of Cleaner Production, v. 147, p. 14-22, 2017.

SHERWANI, A. F.; USMANI, J. A.; VARUN. **Life cycle assessment of solar PV panels**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 540-544, 2010.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. **Limite de equilíbrio detalhado da eficiência das células solares de junção p-n**. Revista de física aplicada, v. 32, n. 3, p. 510-519, 1961.

SILVA, A. M. et al. **Synchrotron radiation micro-XRF and micro-XRD studies of the distribution of elements in human lung tissue samples**. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 28, n. 7, p. 1092-1099, 2013.

SILVA, Camila Correa da. **Análise de viabilidade da implementação da energia solar fotovoltaica em comunidades isoladas: um estudo de caso**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, João Paulo Ferreira da. **Desenvolvimento da concepção de uma máquina compactadora de resíduos vegetais para produção de briquetes**. 2019. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2019. Disponível em <http://iepapp.unimep.br/biblioteca_digital/pdfs/docs/07072021_103225_dissertacao_wil_sondepaulateixeira.pdf>. Acesso em 11.07.23

SILVA, K. O. et al. **Caracterização de resíduos fotovoltaicos: uma revisão**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 104, p. 223-232, 2019.

SILVA, R. F. da. **A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. Revista Processos Químicos, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020.

SIMON, F. et al. **Recycling of CdTe PV modules: A review of current progress and future prospects**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 132, p. 470-478, 2015.

SMITH, J. et al. **Recycling of photovoltaic Solar Power Europe: Global Market Outlook 2018–2022**. Disponível em: <<http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SOLARWORLD AG. **Recycling**. Disponível em: <<https://www.solarworld.de/en/recycling/>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SUNEW. **Reciclagem**. Disponível em: <<https://sunew.com.br/reciclagem/>>. Acesso em: 08 set. 2021.

SUNY GROUP. **Solar Panel Recycling Plant**. Disponível em: https://www.sunygroup.cn/products/Recycling_equipment/Solar-Panel-Recycling-Plant.html. Acesso em: 27 set. 2023.

TAN, H. et al. **EVA degradation and protection in PV modules: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 68, p. 1199-1209, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.116.

TAO, J.; YU, S. **Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules**. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 141, p. 108–124, 2015.

U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE. **List of Critical Minerals 2021**. Washington: U.S. Government Publishing Office, 2021.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE)**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Scandium and Compounds**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/scandium-compounds.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-resource-conservation-and-recovery-act>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

WAMBACH, K. **Life Cycle Assessment of Crystalline Silicon Photovoltaic Panels: ReCiPe Endpoint Analysis and Sensitivity Analysis**. Energies, v. 10, n. 8, p. 1192, 2017.

WANG Y, BAI Y, CHENG YB, WANG S, YANG SH. **Recent progress in dye-sensitized solar cells: from liquid to solid state**. Materials Today. v.18, n.3, p.155-62, 2015.

WANG, L.; YU, X.; SUN, X. **Effect of encapsulant materials on photovoltaic module degradation: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 137, p. 110567, 2021.

WECKEND, S.; ESPINOSA MARTINEZ, N.; HIETE, M. **Recycling of solar panels: An overview on the current status and future prospects**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 60, p. 1283-1293, 2016.

WECKEND, S.; HÜPKES, J.; WILLEKE, G. **Photovoltaics: Basic Design Principles and Components**. In Handbook of Clean Energy Systems (pp. 1-28). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

WECKEND, S.; WADE, A.; HEATH, G. **End of Life Management Solar PV Panels** (IRENA), IEA-P., 2016.

WORLD BANK. **Global Photovoltaic Power Potential by Country**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em <https://documents1.worldbank.org/curated/en/466331592817725242/pdf/Global-Photovoltaic-Power-Potential-by-Country.pdf> .Acesso em 18 julho.2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Air pollution**. World Health Organization, 29 junho 2021. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1>. Acesso em: 24 jun. 2022.

XU, Yan et al. **Global status of recycling waste solar panels: A review**. *Waste management*, v. 75, p. 450-458, 2018.

YI, Y.K.; KIM, H.S.; TRAN, T.; HONG, S.K.; KIM, M.J. **Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules**. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v.64, n.7 p.797•807, 2018.

ZENG, X.; LI, J.; LI, J. **A review on the recycling of waste solar cells and panels**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.70, p.695-709, 2017.

ZHANG, X.; SHEN, W. **Effects of EVA content and cross-linking degree on photovoltaic module properties**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.141, p.82- 89, 2015.

ZHU, Y.; LIU, Y.; XIAO, Y.; et al. **Effect of EVA Encapsulation on the Performance of CdTe Solar Cells**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.95, n.11, p.3038-3043, 2011