

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

Lucas Campos Castelo Branco



**ANÁLISE SWOT DE RECICLAGEM DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

RIO DE JANEIRO

2024

Lucas Campos Castelo Branco

Análise SWOT de Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador: Felipe Sombra dos Santos

Rio de Janeiro


2024

Lucas Campos Castelo Branco


ANÁLISE SWOT DE RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.


Aprovado em 17 de julho de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE SOMBRA DOS SANTOS**
Data: 17/07/2024 20:33:08-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Felipe Sombra dos Santos, D.Sc., EQ-UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE PEREIRA DA SILVA**
Data: 18/07/2024 13:16:41-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Felipe Pereira da Silva, M.Sc., EQ-UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO FERNANDES MAGALHAES DE SOUZA**
Data: 18/07/2024 11:11:05-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Rodrigo F. M. Souza, D.Sc., PUC-Rio

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família. Meus pais, independentemente de meus erros ou acertos ao longo da vida, sempre me apoiaram. Assim, eu tive as oportunidades para conseguir chegar o mais longe possível. Graças a ambos, tenho os sonhos que tenho hoje, além da vontade de fazer a diferença no mundo em que estou envolvido. Por causa de seus ensinamentos, aprendi a balancear responsabilidade com lazer e sempre dar o melhor de mim.

Ao meu irmão, que apesar de atualmente estar fora do país, é uma das únicas pessoas desse mundo que me vê de verdade. Não existe situação desagradável quando estou perto dele. Ele sabe, no final das contas, que o mundo é do jeito que é. E ele não se chateia com esse fato.

À minha namorada que, não importa o quanto eu duvide de mim, sempre me apoia a seguir em frente e a confiar que sou suficiente. O sabor de poder aproveitar os momentos simples da vida é algo inigualável perto da pessoa que posso considerar amar. Agradeço também a meus amigos que, mesmo em tempos difíceis souberam estar lá do meu lado. Por causa da amizade deles consegui passar por muitas situações de estresse que azedariam minha vida.

E, finalmente, mas não menos importante, agradeço ao meu orientador que não poupou paciência durante o período difícil que foi a realização deste trabalho. Ele aceitou me orientar, sabendo o quanto o tema é importante para mim e o quanto me entusiasma. Além disso, me incentivou para a conclusão do trabalho e me forneceu fontes que seriam impossíveis de achar facilmente.

“We are part of this universe; we are in this universe, but perhaps more important than both of those facts, is that the universe is in us.”

Neil deGrasse Tyson

RESUMO

BRANCO, Lucas Campos Castelo

Análise SWOT de Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos

Rio de Janeiro, 2024

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024

Os painéis fotovoltaicos, apesar de serem considerados energias verdes, possuem um problema de logística no seu descarte adequado. Dado que o fim de vida dos painéis de primeira geração estarem terminando. Explorar metodologias que seriam mais apropriadas para a realidade brasileira é fundamental, uma vez que essa tecnologia ainda não chegou em larga escala no Brasil. Este trabalho aborda uma análise de métodos de tratamento de reciclagem, mais especificamente na etapa de cominuição dos módulos fotovoltaicos, através da ferramenta de análise SWOT, com foco na economia brasileira. A metodologia utilizada foi uma revisão bibliográfica dos artigos disponíveis, dissertações, teses, livros técnicos, leis e normas brasileiras. Foram discutidos, entre os métodos existentes e presentes na indústria de reciclagem de painéis fotovoltaicos, os três principais meios de cominuição, definidos como térmico, físico e químico. Para a avaliação destes foi aplicada uma técnica de identificação de cenários com o cruzamento dos fatores da matriz SWOT para definir como cada método se encaixa em um cenário de crescimento, desenvolvimento, manutenção e sobrevivência. Dessa forma, foi possível concluir que o melhor grupo de tratamento para a situação atual do Brasil, foi o tratamento térmico, utilizando o método de Expansão solvotérmico com decomposição térmica (SSTD) ou o Eletrotérmico, escolhidos entre 11 métodos possíveis. Todos os métodos de tratamento químico e físico apresentam algum tipo de efluente/resíduo tóxico que requer manuseio cuidadoso e tratamento adequado e/ou não possuem custo-benefício suficiente por serem caros demais ou demorarem tempo demais. Os tratamentos térmicos, em contrapartida, já são bastante comercializados e produzem a menor quantidade de compostos tóxicos, dependendo somente de matriz energética.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico, Delaminação, Análise SWOT, Reciclagem

ABSTRACT

It's important to note the following information: Despite being considered a form of green energy, photovoltaic panels have a logistical issue regarding proper disposal, especially as the end-of-life for first-generation panels approaches. It is crucial to explore more suitable methods for the Brazilian context, considering that this technology has not yet been widely adopted in the country. In this study, we analyze the various recycling methods, specifically focusing on the comminution stage of photovoltaic modules, using the SWOT analysis tool focusing on the Brazilian economy. Our methodology involved conducting a comprehensive review of available literature, including articles, dissertations, theses, technical books, laws, and Brazilian standards. Among the photovoltaic panel recycling industry methods, we discussed the three main comminution methods: thermal, physical, and chemical. To evaluate these methods, we applied a scenario identification technique by mapping the factors of the SWOT matrix to determine how each method fits into different scenarios, such as growth, development, maintenance, and survival. Our analysis concluded that the most suitable treatment method for the current situation in Brazil is thermal treatment, particularly the Solvothermal Expansion with Thermal Decomposition (SSTD) or Electrothermal method, which was chosen from a pool of 11 possible methods. It is important to note that all chemical and physical treatment methods produce some form of toxic effluent or waste, which requires careful handling and proper treatment or may not be cost-effective due to high expenses or extended processing times. On the other hand, thermal treatments are widely used commercially and result in the least toxic compounds, dependent only on the energy matrix.

Keywords: Photovoltaic panel, Delamination, SWOT Analysis, Recycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Módulo fotovoltaico de a) primeira geração e b) segunda geração	144
Figura 2: Célula solar monocristalina(a) e policristalina(b), respectivamente	177
Figura 3: Célula fotovoltaica de primeira geração	177
Figura 4: Módulo fotovoltaico de filme fino	199
Figura 5: Estrutura de uma célula fotovoltaico sem e com 2 junções, respectivamente	20
Figura 6: Modelo esquemático da composição de uma célula de telureto de cádmio..	221
Figura 7: Estrutura de célula solar HIT a)com camada a-Si:H(i) e b)sem essa camada	22
Figura 8: Estrutura cristalina da perovskita	233
Figura 9: Esquematização de uma camada de ponto quântico	244
Figura 10: Esquematização do funcionamento de uma DSSC	255
Figura 11: Esquematização de uma célula de multijunção.....	266
Figura 12: Causa e efeito de corrosão no módulo fotovoltaico	288
Figura 13: Passos da corrosão na parte fronteira e traseira de uma célula solar	288
Figura 14: Descoloração de módulos fotovoltaicos	299
Figura 15: Exemplos de delaminação de células fotovoltaicas	30
Figura 16: Exemplos de pontos de aquecimento de células fotovoltaicas	31
Figura 17: Percentagem de cada fonte na matriz elétrica brasileira em 2024	37
Figura 18: Evolução da energia fotovoltaica no Brasil ao longo dos anos.....	322
Figura 19: Análise SWOT modelo para REEE	33
Figura 20: Fluxograma das possíveis rotas de reciclagem de módulos fotovoltaicos..	399
Figura 21: Esquematização do método de faca quente.....	41
Figura 22: Produtos de método de pulso de alta voltagem em diferentes voltagens.....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificação dos diferentes tipos de células solares.....	266
Quadro 2: Esquema geral de matriz SWOT	36
Quadro 3: Compilação de tratamentos físicos.....	477
Quadro 4: Compilação de tratamentos físicos.....	488
Quadro 5: Compilação de tratamentos físicos.....	499
Quadro 6: Forças do ambiente interno das técnicas de tratamento	5050
Quadro 7: Fraquezas do ambiente interno das técnicas de tratamento.....	51
Quadro 8: Oportunidades do ambiente externo das técnicas de tratamento.....	52
Quadro 9: Ameaças do ambiente externo das técnicas de tratamento.....	52
Quadro 10: Matriz SWOT de todos os métodos distintamente únicos de tratamento	5353
Quadro 11: Tabela de cruzamento da matriz SWOT	544

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	10
2.	Objetivos Gerais	12
2.1.	Objetivos Específicos.....	12
3.	Revisão Bibliográfica	13
3.1	Painel Fotovoltaico – Histórico	13
3.2	Composição dos painéis fotovoltaicos.....	13
3.2.1.	Moldura de Alumínio	14
3.2.2.	Vidro de Cobertura.....	15
3.2.3.	Encapsulantes	15
3.2.4.	<i>Backsheet</i>	15
3.2.5.	Caixa de junção	16
3.2.6.	Células Fotovoltaicas	16
3.3.	Tipos de células fotovoltaicas	16
3.3.1	Células fotovoltaicas de primeira geração	16
3.3.1.1.	Célula solar fotovoltaico de silício monocristalino (m-si)	17
3.3.1.2.	Célula solar fotovoltaica de silício multicristalino/policristalino (p-si)	18
3.3.1.3.	Célula solar de fita de silício	18
3.3.1.4.	Célula solar de silício epitaxial.....	18
3.3.2.	Células fotovoltaicas de segunda geração	18
3.3.2.1.	Célula solar de silício amorfo (a-Si).....	19
3.3.2.2.	Célula solar a base de seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS).....	20
3.3.2.3.	Célula solar a base de telureto de cádmio/sulfeto de cádmio (CdTe/CdS)	20
3.3.2.4.	Célula solar à base de arseneto de gálio (GaAs) III-V	21
3.3.2.5.	Célula solar de silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$).....	21
3.3.2.6.	Célula solar HIT	22
3.3.3.	Célula fotovoltaica de terceira geração	22
3.3.3.1.	Célula solar Perovskita	23
3.3.3.2.	Célula solar a base de nanocristais/nanocristalina.....	23
3.3.3.3.	Célula solar sensibilizada por corante (DSSC).....	24
3.3.3.4.	Célula solar orgânica/polimérica (OSC).....	25
3.3.3.5.	Célula solar de multijunção	25
3.4.	Degradação de módulos fotovoltaicos	27

3.4.1. Corrosão	27
3.4.2. Descoloração	28
3.4.3. Delaminação.....	29
3.4.4. Quebra e fissuras de células	30
3.4.5. Ponto de aquecimento	30
3.4.6. Bolhas.....	31
3.4.7. Degradação induzida por potencial (PID)	31
3.5. Situação econômica	31
3.6. Legislação sobre reciclagem de lixo eletrônico	34
4. Metodologia.....	36
4.1. Análise SWOT DE Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) 36	
5. Reciclagem de módulos fotovoltaicos	39
5.1. Tratamento de módulo fotovoltaico.....	40
5.1.1. Tratamento físico.....	40
5.1.1.1. Método da faca quente.....	41
5.1.1.2. Britagem de painel fotovoltaico	41
5.1.1.3. Método de trituração com pulso de alta voltagem.....	42
5.1.1.4. Técnica de irradiação por <i>laser</i>	42
5.1.1.5. Técnica de cominuição e classificação seletiva.....	43
5.1.2. Tratamento térmico	43
5.1.2.1. Expansão solvotérmico com decomposição térmica (SSTD).....	44
5.1.2.2. Método eletrotérmico	44
5.1.3. Tratamento químico	44
5.1.3.1. Método de submersão com solvente orgânico.....	45
5.1.3.2. Método de submersão com auxílio de ultrassom.....	45
5.1.3.3. Método de submersão com inorgânico	45
5.1.3.4. Método de submersão com CO ₂ supercrítico	46
5.1.4. Substituição de componentes defeituosos	46
5.2. Tabela de dados de métodos de tratamento	47
6. Análise SWOT de meios de reciclagem	50
7. Conclusão	58
8. REFERENCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

O petróleo que, atualmente, é considerado a fonte principal de energia mundial, vem sendo cada vez mais criticado pelos danos causados ao meio ambiente. Os principais problemas se caracterizam como aquecimento global, a grande quantidade de gases poluentes liberados na atmosfera, contaminação de águas e solo e poluição do ar (FARRELL, 2019; LAMEIRINHAS, 2022; PASTUSZAK, 2022).

Com relação à sustentabilidade, o combustível fóssil pode ser considerado o pior agressor das fontes de energia, no qual pode gerar 400 a 1000g.kWh⁻¹ de emissões de CO₂ em plantas térmicas (PALETTA, 2012). Isso se dá em função das conversões energéticas que ocorrem entre combustível e efluente serem desproporcionais aos padrões ambientais vigentes. Além deste fato, os combustíveis fósseis são considerados uma fonte energética limitada. Dessa forma, a busca por novas fontes energéticas, livres destes principais problemas, é uma necessidade desafiadora (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; FARRELL, 2019; LAMEIRINHAS, 2022; PASTUSZAK, 2022).

Por outro lado, a energia fotovoltaica é considerada como uma energia do futuro. Ela é uma das energias emergentes globalmente, gerando uma quantidade de energia considerável, de forma mais acessível ao público comum, sem gerar emissões de gases de efeito estufa (GEEs). A partir do ano de 1999, foi possível observar um forte crescimento deste tipo de energia, devido aos programas alemão, espanhol e japonês, que integram módulos fotovoltaicos em edificações e zonas urbanas (XU, 2018). Esses módulos permitiam que as instalações residenciais produzissem a própria energia que consumiam, sem gerar poluentes durante a produção de energia (LAMEIRINHAS, 2022; PALETTA, 2012). Mesmo promovendo a geração de energia, de forma mais sustentável, os painéis fotovoltaicos apresentam um grande desafio logístico com relação ao seu correto descarte após sua vida útil (CHOWDHURY, 2020; FARRELL, 2019).

O painel fotovoltaico é constituído principalmente por célula fotovoltaica, que tem em média, um tempo de vida útil de 25-30 anos. Mesmo com advento tecnológico e as vantagens da energia fotovoltaica, já é possível sentir os efeitos de seu descarte em massa, em função da inexistência de ações para o correto descarte desse tipo de material. (CHOWDHURY, 2020; FARRELL, 2019; XU, 2018). A corrida pela produção de painéis, por empresas e organizações não governamentais (ONGs) que permitam obter

um módulo com maior tempo de vida e biodegradável vem sendo um desafio. Todavia, eles ainda necessitam de descarte e um tratamento adequado dos componentes constituintes do painel solar (CHOWDHURY, 2020).

Para definir realmente se a energia fotovoltaica pode ser classificada como uma “energia do futuro” deve-se também observar as extensas possibilidades de reciclagem e reaproveitamento dos materiais empregados na construção de painéis fotovoltaicos de modelos novos e já existentes (KALOGIROU, 2016; LAMEIRINHAS, 2022).

2. OBJETIVOS GERAIS

O presente esse trabalho está voltado para uma análise SWOT das possíveis rotas de reciclagem dos painéis fotovoltaicos, após o término de vida útil. Além disso, definir quais seriam os meios de reciclagem que possuem mais fatores facilitadores e dificultadores, focando principalmente na realidade brasileira.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Análise técnica e ambiental de módulos fotovoltaicos comercializados mundialmente.
- Comparar os possíveis meios de degradação de um painel fotovoltaico.
- Avaliação de fatores positivos e negativos, assim como internos e externos dos diferentes meios de reciclagem existentes dos módulos fotovoltaicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PAINEL FOTOVOLTAICO – HISTÓRICO

Um painel solar se caracteriza como o meio principal utilizado para se absorver a energia solar, no qual os fótons oriundos da radiação solar são absorvidos pelas células fotovoltaicas e transformados em energia elétrica, para o consumo geral, populacional, governamental ou até mesmo industrial (LAMEIRINHAS, 2022).

A partir de 1839, durante a Revolução Industrial, foi demonstrado pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, o efeito fotovoltaico. O efeito foi provado quando mergulharam placas de prata ou de platina em eletrólitos e as expuseram à radiação solar. Essa combinação gerou uma diferença de potencial, que apesar de ser muito pequena para se ter proveito efetivo na época, deu origem à ideia das células fotovoltaicas (LAMEIRINHAS, 2022).

No ano de 1883, *Charles Fritz* produziu a primeira célula fotovoltaica a partir do elemento selênio com pelo menos 1% de eficiência, após a fotocondutividade do material ser descoberta acidentalmente por *Willoughby Smith*, em 1873. Apesar da baixa eficiência, o feito pode provar que a absorção da placa era afetada pelo material de que era feito (LAMEIRINHAS, 2022).

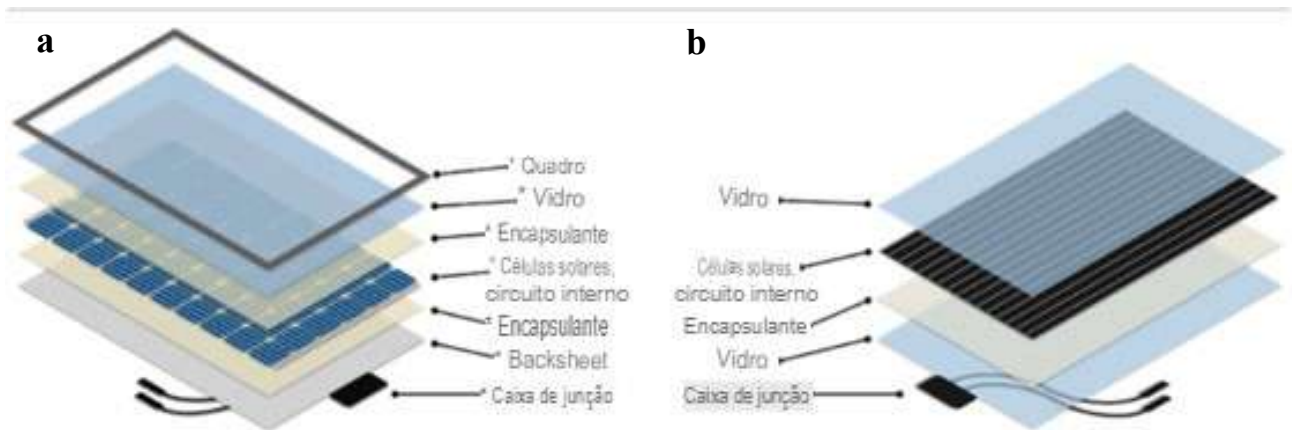
Finalmente no ano de 1954, *Russel Ohl*, com a ajuda de cientistas da *Bell Labs*, *Calvin Fuller*, *Gerald Pearson* e *Daryl Chapin*, construíram e patentearam a primeira célula fotovoltaica à base de sílica. Apesar de ter uma potência 5 mW, 6% de eficiência e uma área de 2 cm², foi a base para a maioria dos painéis solares existentes atualmente, que chegam a produzir até 20% de eficiência em painéis acessíveis à população, dando origem ao painel solar moderno (LAMEIRINHAS, 2022).

3.2 COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis solares são construídos de maneiras distintas, dependendo do tipo de célula fotovoltaica. A composição geral é caracterizada pela presença de um padrão comum a todos os módulos, constituído de vidro, encapsulante, célula fotovoltaica e caixa de fusíveis. A ordem e os detalhes, assim como os componentes extras, dependem do tipo

de módulo fotovoltaico. A composição principal dos módulos é feita de painéis à base de silício (primeira geração) e à base de filme fino (segunda geração), sendo representados na Figura 1. Já os módulos de terceira geração não possuem um padrão comum de componentes, sendo sua composição única a cada modelo (AGHAEI, 2022; DIVYA, 2023; KALOGIROU, 2016; NDIAYE, 2013).

Figura 1: Módulo fotovoltaico de a) primeira geração e b) segunda geração



Fonte: Adaptado de AGHEI, 2022

3.2.1. Moldura de Alumínio

O quadro de alumínio tem a função de segurar e anexar todos os componentes restantes do painel promovendo estabilidade, resistência e fixação. A estabilidade está associada aos fatores erosivos externos, como chuva e vento. O material utilizado na construção da moldura pode ser de alumínio anodizado (mais comum) ou de alumínio revestido a pó. O alumínio anodizado tem habilidade de aumentar a capacidade de absorção do painel fotovoltaico, além de maior resistência física e fácil manutenção.

Já o alumínio revestido a pó possui a vantagem de ser produzido sob diversas cores, facilitando sua integração em paisagens urbanas. Porém, é menos resistente e passível de reparo, quando necessário. Ambos os materiais têm poucas chances de se degradarem, efetivamente diminuindo a necessidade de manutenção (AGHAEI, 2022; CHEN, 2023; HARTLEY, 2020).

3.2.2. Vidro de Cobertura

São produzidos principalmente a partir de sílica e de metais para possuir resistência contra todos os fatores externos que possam comprometer o painel solar, de esforço mecânico até erosão, possibilitando uma maior eficiência do painel. O vidro característico deve ser temperado, leve e transparente, com uma espessura média de 3,2 mm. Ademais, os vidros de cobertura são isolantes elétricos e impermeáveis a umidade e aos gases. Também são usados na cobertura traseira, caso o módulo seja bifacial (AGHAEI, 2022).

3.2.3. Encapsulantes

A função principal dos materiais encapsulantes no painel solar é a adesividade, promovida entre a célula solar e a cobertura dianteira ou traseira. Porém, também é necessário que o material encapsulante possua as características de transparência e baixa resistência térmica, além de ser estável a altas temperaturas e a exposição à radiação ultravioleta (UV). O EVA (etileno vinil acetato) é o material mais empregado como material encapsulante dos painéis fotovoltaicos, em função ao custo-benefício do material (AGHAEI, 2022; CHEN, 2023).

O EVA é uma resina polimérica transparente, sendo um copolímero de etileno e vinil acetato. Geralmente sua composição mássica é de 10-40% de vinil acetato, sendo o resto etileno. Além de ser um material com características físicas e químicas vantajosas, a encapsulação de painéis solares, ainda os protege de uma série de degradações. Apresenta uma alta transparência, com uma transmissão ótica de 90% (CHITRA, 2020).

3.2.4. Backsheet

É utilizado para promover o isolamento elétrico e a proteção de qualquer fator do ambiente externo. Geralmente é composta de multicamadas: a com função de ser a mais resistente ao ambiente, uma com isolamento elétrico e, a mais interna com bom material adesivo. Muitas vezes o *backsheet* pode ser substituído por outro vidro de cobertura, prática muito realizada em módulos de segunda geração. Todavia, isso depende de cada modelo e as especificações do fabricante (AGHAEI, 2022).

3.2.5. Caixa de junção

A caixa de junção fica localizada na parte inferior ou na lateral do painel, sendo o primeiro tipo, a mais comum. A principal função é proteger a fiação, conexão e diodos de *by-pass* do módulo. Essas caixas são produzidas em policarbonato (AGHAEI, 2022; CHEN, 2023; XU, 2018).

3.2.6. Células Fotovoltaicas

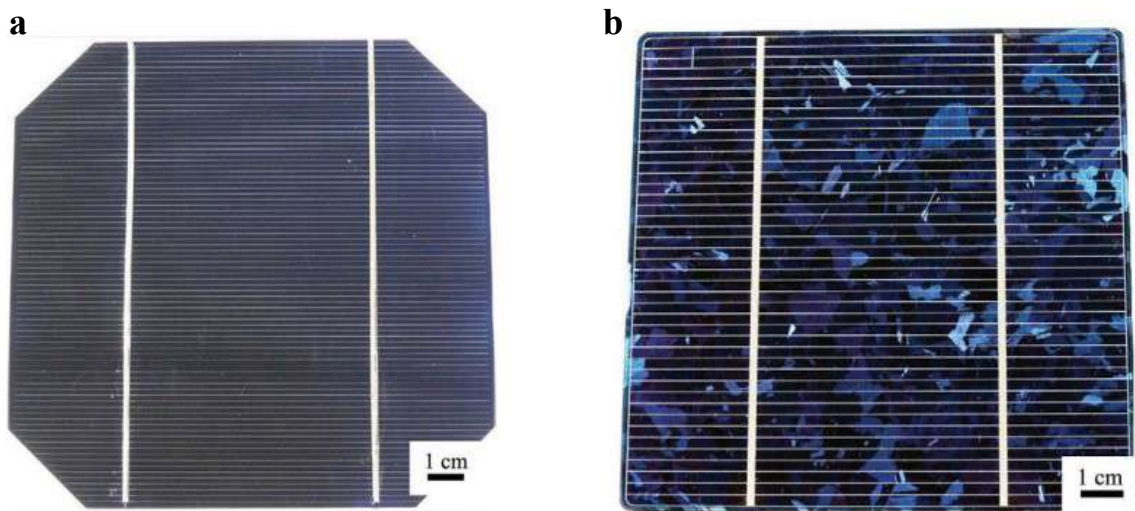
As células fotovoltaicas são o componente pelo qual o módulo solar consegue efetivamente absorver energia solar e transformar em eletricidade. Cada célula individualmente produz uma quantidade baixa de energia. Dentro de um módulo, várias células são alinhadas e encapsuladas em conjunto para aumentar a potência elétrica. Estes módulos são produzidos de várias maneiras diferentes, sendo divididos em primeira, segunda e terceira geração. Estas classificações também definem a composição da célula, assim como a eficiência do módulo em geral (KALOGIROU, 2016; PASTUSZAK, 2022).

3.3. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

3.3.1 Células fotovoltaicas de primeira geração

As células à base de silício são caracterizadas como sendo de primeira geração. Painéis com células deste tipo são majoritariamente formados por seis componentes principais, como quadro de alumínio, vidro de cobertura, encapsulante, célula solar, *backsheet* e, finalmente, a caixa de junção. São ainda os mais prevalentes em termos de geração de energia, correspondendo 95% de toda a geração fotovoltaica até 2020. As células deste tipo geram energia a partir de uma área de semicondutor chamado de junção P-N. A ilustração de alguns tipos destes painéis é mostrada na Figura 2 (CHEN, 2023; KALOGIROU, 2016; LAMEIRINHAS, 2022; MAANI, 2020; PASTUSZAK, 2022).

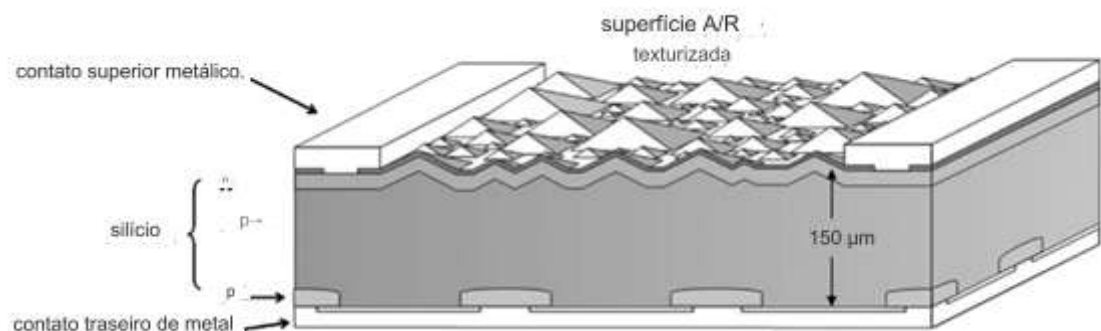
Figura 2: Célula solar monocristalina(a) e policristalina(b), respectivamente



Fonte: MILES, 2007

As células fotovoltaicas de primeira geração apresentam a mesma composição geral, mudando somente o tipo de silício que é encontrado na camada do semicondutor P-N, conforme é apresentado na Figura 3. Os seus principais tipos serão comentados na seção seguinte.

Figura 3: Célula fotovoltaica de primeira geração



Fonte: Adaptado de BAGNALL, 2008

3.3.1.1. Célula solar fotovoltaico de silício monocristalino (m-si)

Se caracteriza por ser o *design* mais simples, sendo representado pela Figura 3. Essa célula possui uma *gap* de energia de 1,1 eV e o tempo de vida de 25 anos. A célula monocristalina foi a primeira a ser comercializada em maior escala, dominando o mercado durante o período de 1954 a 2000. A partir daí, passou a competir com modelos melhores, como tipo a de silício multicristalino (MILES, 2005; MILES, 2007; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

3.3.1.2. Célula solar fotovoltaica de silício multicristalino/policristalino (p-si)

Apesar de possuir o design idêntico à célula monocristalina, seu diferencial é a qualidade do silício presente. Em vez de simplesmente utilizar o material, ele é derretido em um molde e deixado para resfriar. Assim são formadas as barras de silício com configuração molecular de grãos colunares, que dão ao material uma maior densidade molecular, menores custos de produção e uma menor sensibilidade à qualidade da matéria prima. Permite obter um *gap* de energia de 1,7 eV, e um tempo de vida de 14 anos. Geralmente apresenta uma eficiência de 2~3% menos que as células monocristalinas, porém, ainda comparativamente, somente custam 80% para se produzir (MILES, 2005; MILES, 2007; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

3.3.1.3. Célula solar de fita de silício

A partir de um método denominado EFG (“crescimento alimentado por filme definido pela borda”), um corante de grafite é imerso em silício fundido, e o silício sobe para o espaço do corante por ação capilar. Desta forma é possível extrair uma folha de silício 2-D autossustentável do corante. Esta folha, portanto, é utilizada nesse tipo de célula. A célula de fita de silício é mais barata que a célula multicristalina, porém possui uma menor eficiência energética (MILES, 2005; ROHAN, 2019).

3.3.1.4. Célula solar de silício epitaxial

As células de silício cristalino epitaxial são criadas a partir de um método denominado de deposição química por vapor (DQV). Este método é usado para se criar sólidos com alta qualidade e performance. Assim se cria uma tira deste silício que é utilizado na célula. Se o método puder ser realizado em temperatura ambiente, em processo de alto rendimento, a célula alcança um rendimento parecido com a de silício monocristalino, com um custo de produção significativamente reduzido (ROHAN, 2019).

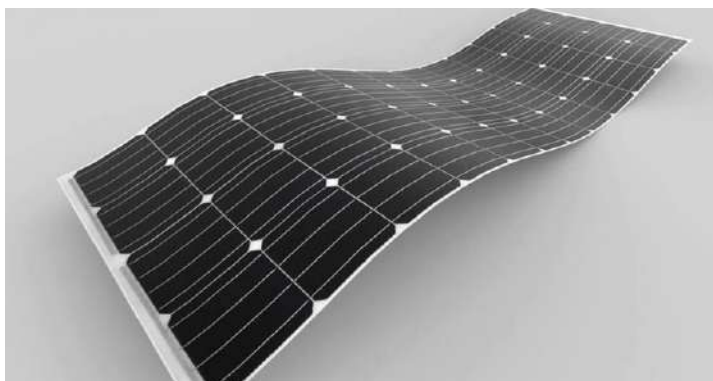
3.2. Células fotovoltaicas de segunda geração

Os painéis solares de segunda geração são caracterizados como células de filme fino ou de silício amorfo, conforme apresentado na Figura 4. São usados principalmente em estações de energia fotovoltaica de escala utilitária. Estes painéis são majoritariamente

formados de vidro de cobertura, encapsulante, célula solar, *backsheet* e, finalmente, a caixa de junção.

Sua principal vantagem sobre painéis com células de primeira geração é que conseguem produzir energia sendo extremamente finos, não necessitando de camadas tão grossas de semicondutor. Enquanto uma célula de primeira geração uma espessura média de 350 μm , as células de filme fino possuem 1 μm de espessura, aproximadamente. Apesar desta vantagem, a eficiência é um pouco reduzida, quando se compara com as células de primeira geração. Os seus principais tipos serão comentados na seção seguinte (LAMEIRINHAS, 2022; MAANI, 2020; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019).

Figura 4: Módulo fotovoltaico de filme fino

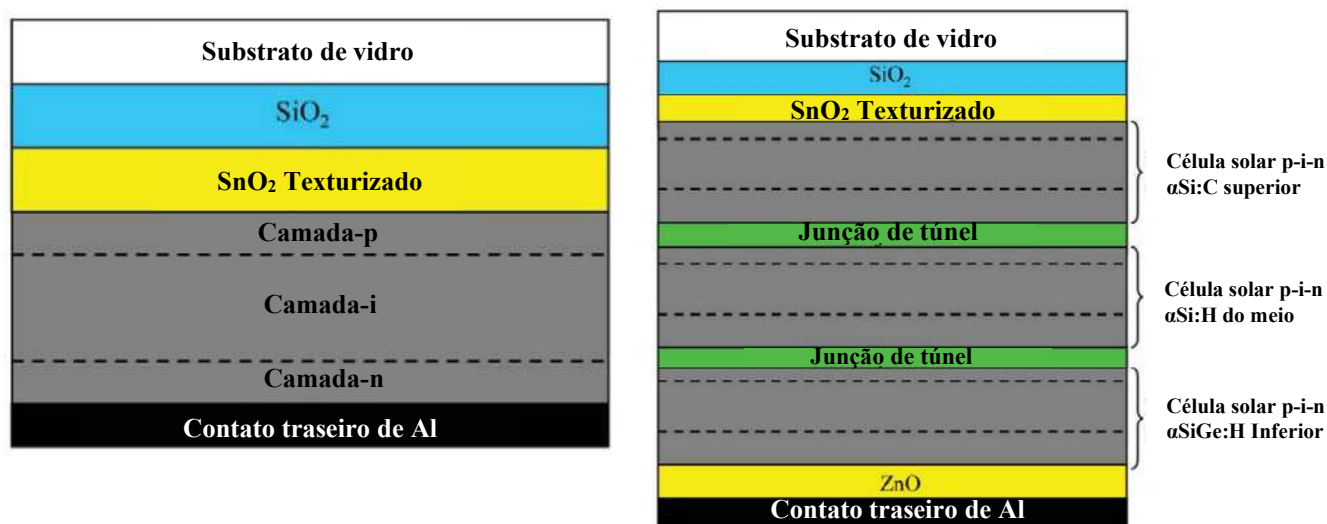


Fonte: MAANI, 2020

3.3.2.1. Célula solar de silício amorfo (a-Si)

As células de silício amorfo são criadas a partir deposição química por vapor (DQV) de gases contendo silano (SiH_4). Suas estruturas possíveis podem ser observadas na Figura 5. Apesar de ser consideravelmente mais fino que a célula monocristalina, esta célula amorfa possui um maior *gap* de energia de 1,7 eV. Apresentam uma vida útil de 15 anos. Possui eficiência instável. Este problema pode ser geralmente circundado com a adição de pinos de junção entre as camadas de silício (MILES, 2005; MILES, 2007; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

Figura 5: Estrutura de uma célula fotovoltaico sem e com 2 junções, respectivamente



Fonte: Adaptado de MILES, 2007

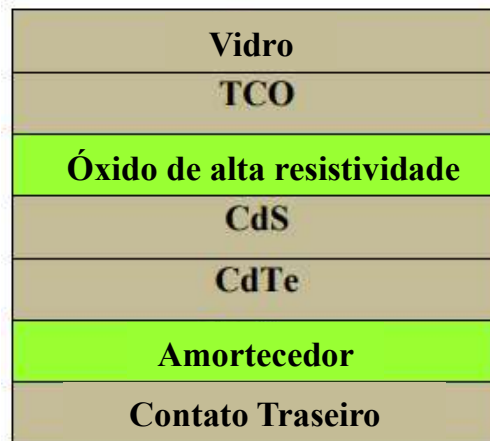
3.3.2.2. Célula solar a base de seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS)

Esta célula apresenta como semicondutor da célula o próprio material de seleneto de cobre, índio e gálio, sendo este o próprio material de *gap* de energia. Possui a segunda maior eficiência entre qualquer outra célula de filme fino, chegando a 20% de eficiência de absorção, com recorde de 23,4%. A fabricação ocorre a partir de métodos como: pulverização catódica, evaporação, técnica de revestimento eletroquímico, impressão e deposição por feixe de elétrons. O *gap* de energia possui 1,7 eV e uma vida útil de 12 anos (PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

3.3.2.3. Célula solar a base de telureto de cádmio/sulfeto de cádmio (CdTe/CdS)

A célula de filme fino composta com semicondutor de telureto de cádmio é a única célula de filme fino que tem potencial de rivalizar com a de silício cristalino em custo/watt, conforme pode ser visto na Figura 6. Possui um potencial de 1,5 eV de *gap* de energia e alta absorção óptica. Esse tipo de célula não necessita de tanto material para confecção, tornando-a mais barata. A célula em si é tem composição de telureto de cádmio, porém pode ser adicionado sulfeto de cádmio. Apesar da viabilidade econômica, o maior problema desta célula é o fato de cádmio ser um composto tóxico, gerando dificuldades em seu descarte adequado, necessitando de tratamento posterior da célula (MILES, 2005; MILES, 2007; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

Figura 6: Modelo esquemático da composição de uma célula de telureto de cádmio



Fonte: Adaptado de RATHORE, 2019

3.3.2.4. Célula solar à base de arseneto de gálio (GaAs) III-V

Essa célula se diversifica das demais pelo fato de ter a maior eficiência possível, chegando a valores de 28,8% de eficiência de absorção de radiação em recorde. Porém como tanto seus materiais são raros, como seu método de produção, ela é caracterizada como célula mais cara para se produzir. Seu *gap* de energia chega ao valor de 1,43 eV. Por causa de todos esses fatores, é mais utilizado em estações espaciais, nas quais o espaço é mais escasso e, conseqüentemente, justifica o preço de produção. A célula de arseneto de gálio é classificada como célula solar de junção simples III-V, junto com as células de fosfeto de índio (InP) e antimoneto de gálio (GaSb) (AL-EZZI, 2022; MILES, 2007; ROHAN, 2019).

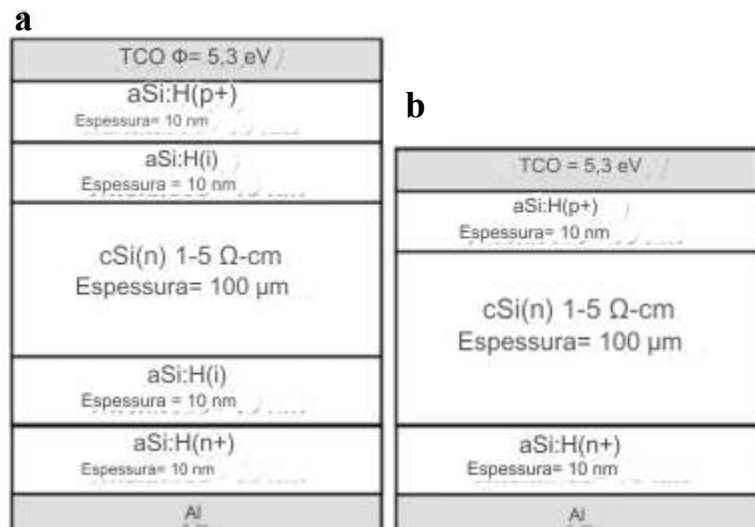
3.3.2.5. Célula solar de silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$)

Caso no processo de fabricação da célula de silício amorfo, o silano (SiH_4) esteja diluído em hidrogênio (H_2), é formado na verdade uma célula de silício microcristalina ou nanocristalina. As propriedades físicas deste se assemelham mais a células mono/multicristalinas do que silício amorfo em si, especialmente no caso de estabilidade em altas intensidades de iluminação. Existem estudos em busca de se desenvolver uma célula híbrida de silício amorfo e microcristalino a fim de aumentar consideravelmente sua eficiência e estabilidade (MILES, 2005; MILES, 2007; PASTUSZAK, 2022).

3.3.2.6. Célula solar HIT

Células solares HIT (célula fotovoltaica híbrida de heterojunção) possuem camadas de Si amorfo depositado em ambas as faces de uma bolacha texturizado de Si monocristalino, como representado na Figura 7. Com eficiência de absorção superior a 21%, as vantagens desta estrutura incluem o potencial de alta eficiência, passivação superficial muito boa, processamento em baixa temperatura, tempo de retorno de energia reduzido e custo reduzido em relação a dispositivos convencionais de Si. A célula é fabricada a partir do processo de deposição química em fase de vapor assistida por plasma, que ocorre na temperatura de 175°C ou 250°C, e geralmente possui um *gap* de energia de 1.55 eV a 1.87 eV (BJELOPAVLIC, 2010; MILES, 2007).

Figura 7: Estrutura de célula solar HIT a) com camada a-Si:H(i) e b) sem essa camada



Fonte: Adaptado de BJELOPAVLIC, 2010

3.3.3. Célula fotovoltaica de terceira geração

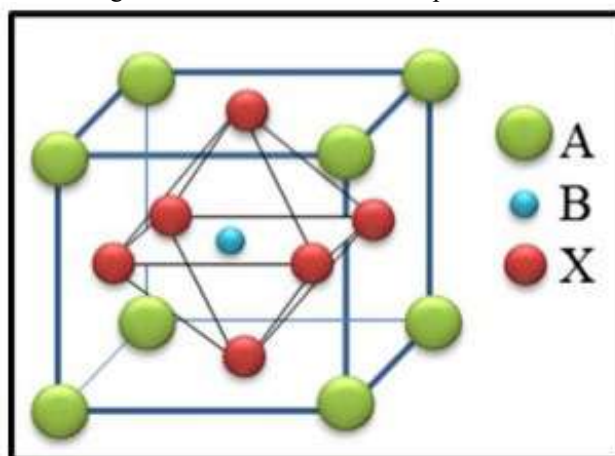
As células solares de terceira geração são classificadas como células solares de que não se encaixam no padrão dos comentados anteriormente. Este tipo de célula usa métodos não convencionais de fabricação para tentar superar os padrões estabelecidos por módulos já comercialmente utilizados, seja com novos materiais ou configuração de componentes. A sua base é em função de tecnologias de células de segunda geração, descartando o conceito de junção P-N padrão. Além da composição mencionada, esse tipo de célula pode ainda apresentar compostos orgânicos em sua composição. Os seus

principais tipos serão comentados na seção seguinte (CHOWDHURY, 2020; LAMEIRINHAS, 2022; PASTUSZAK, 2022).

3.3.3.1. Célula solar Perovskita

A Perovskita é um composto do tipo ABX_3 , onde X pode ser definido pelos halogênios I^- , Br^- e Cl^- . A e B são cátions de tamanhos diferentes, conforme é apresentado na Figura 8. Sua maior vantagem é o fato que os componentes X e A podem ser trocados por outros de mesma categoria, gerando uma variedade de bandas de energia possíveis (1,5~3 eV). É possível obter uma eficiência de conversão de até 9,7%, que diminui com o aumento de temperatura. Apesar de ainda não ser comercialmente viável, é uma tecnologia ainda muito nova, podendo ter mais avanços e vantagens no futuro (LAMEIRINHAS, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

Figura 8: Estrutura cristalina da perovskita



Fonte: RATHORE, 2019

3.3.3.2. Célula solar a base de nanocristais/nanocristalina

As células nanocristalinas também podem ser chamadas de pontos quânticos (QDs), cujo modelo esquemático é ilustrado na Figura 9. São fabricadas com crescimento epitaxial em um substrato de cristal. As células acabam cercadas por barreiras de alto potencial em uma forma tridimensional. Assim, os elétrons e os buracos de elétrons se tornam energia discreta por estarem confinados em um espaço pequeno. Consequentemente, a energia de tais elétrons depende do tamanho do ponto quântico. Possuem alto coeficiente de absorção dado que seu tamanho não passa de alguns nanômetros (PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019).

Figura 9: Esquematização de uma camada de ponto quântico

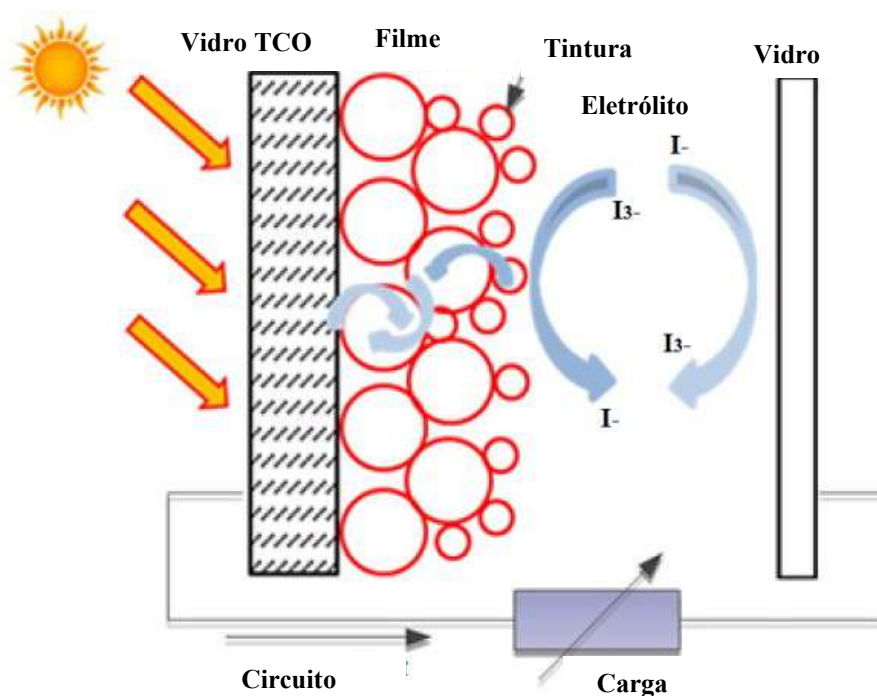
Substrato	
Injeção de elétrons	e⁻
QD	
Buraco	p⁺
Anodo (Transparente)	

Fonte: Adaptado de RATHORE, 2019

3.3.3.3. Célula solar sensibilizada por corante (DSSC)

O maior diferencial da DSSC, e o que a faz tão interessante na absorção de energia solar é que, ao contrário de todas outras células sólidas, nesta há um componente líquido crucial ao funcionamento. A célula contém um eletrodo semicondutor nanoporoso de óxido de titânio (TiO₂), que fica em contato com um corante orgânico, e que geralmente é um complexo de rutênio ou ósmio. Do outro lado do corante há uma solução eletrolítica onde ocorre a troca de elétrons. Os métodos de fabricação baratos e o valor de eficiência de absorção de mais de 10% (em alguns casos até 13%) tornam a DSSC promissora. Seu problema principal está na estabilidade da célula. (MILES, 2005; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019). O modelo esquemático de funcionamento desse tipo de célula é ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Esquemática do funcionamento de uma DSSC



Fonte: Adaptado de PASTUSZAK, 2022

3.3.3.4. Célula solar orgânica/polimérica (OSC)

Células fotovoltaicas poliméricas são produzidas a partir de filme fino de semicondutores orgânicos ou poliméricos, empregando compostos como: polifenileno, vinileno, ftalocianina de cobre, fulerenos de carbono e derivados de fulereno.

A principal vantagem desta célula é o método de processamento de seus materiais que é feito a partir de uma única solução em todo o processo. Isto leva à possibilidade de um processo de produção contínuo em larga escala com menores custos. A maior desvantagem é que sozinha apresenta eficiências de conversão de energia próximo de 3%. Porém, na década de 2010, houve um grande avanço no qual, usando as combinações de compostos aceptores de heterojunções, possibilitou alcançar valores de eficiência de 14% a 17% (MILES, 2005; PASTUSZAK, 2022; RATHORE, 2019; ROHAN, 2019).

3.3.3.5. Célula solar de multijunção

Uma célula solar de multijunção é definida por apresentar vários semicondutores P-N em junção, sendo que cada um gera a própria corrente elétrica em uma frequência de luz diferente. Assim a condutividade geral e a eficiência da célula aumentam

consideravelmente. Geralmente os semicondutores são conectados por túneis de junção e seus valores específicos podem ser ajustados por suas dimensões de grossura e sua banda de energia. A célula de multijunção é produzida com semicondutores de filme fino, geralmente de forma monolítica, cujo modelo esquemático é apresentado na Figura 11 (LAMEIRINHAS, 2022; MILES, 2005; PASTUSZAK, 2022; ROHAN, 2019).

Figura 11: Esquemática de uma célula de multijunção



Fonte: Adaptado de PASTUSZAK, 2022

No Quadro 1 são apresentadas algumas especificações dos diferentes modelos de células solares.

Quadro 1: Especificação dos diferentes tipos de células solares

Material da Célula	Eficiência Teórica	Eficiência Prática	Custo/Watts	Tempo de Vida útil
	(%)	(%)		
Monocristalina	20~26	12~18	48	25
Seleneto de cobre, índio e gálio	20	14	45	12
Filme fino de arseneto de gálio	28,8	22	29	18
Silício amorfo	12~14	5~12	40	15
Telureto de cádmio	15~16	5~10	39	20
Arseneto de gálio	26~32	18~25	18	20
Fita de silício	8~10	<10	25	14

Bifacial	19,8~21,4	13	11	30
Perovskita	23	20	10	20

Fonte: Adaptado de ROHAN, 2019

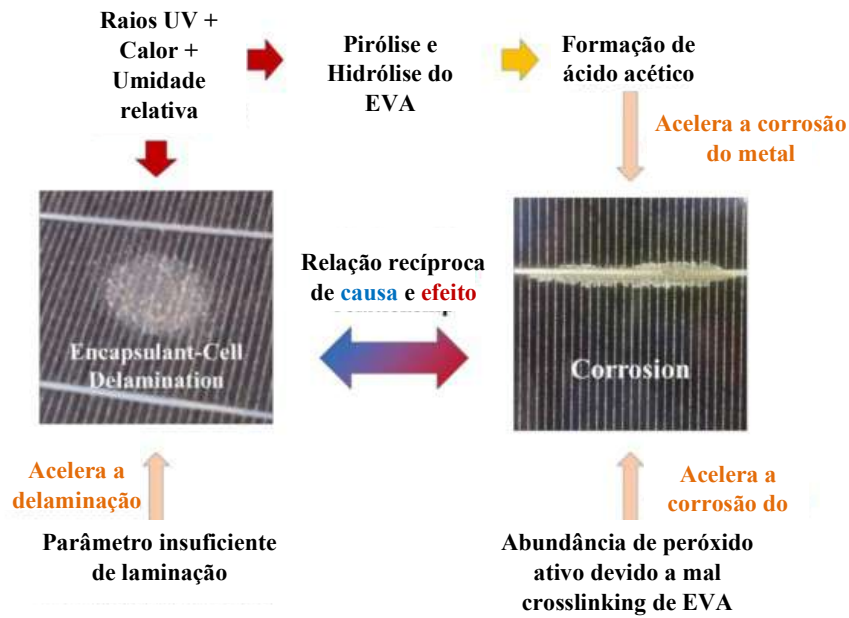
3.4. DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A degradação de qualquer módulo fotovoltaico, independentemente de seu tipo, é caracterizada pela ineficiência da célula, em absorver luz solar, seja por descoloramento, corrosão, dano físico ou até baixa conversão. Como a eficiência de um módulo fotovoltaico naturalmente tende a diminuir com o tempo, esses problemas geralmente são identificados quando ficam com valores de eficiência e absorção abaixo do esperado, dado seu tempo de vida quando é avaliada (LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

3.4.1. Corrosão

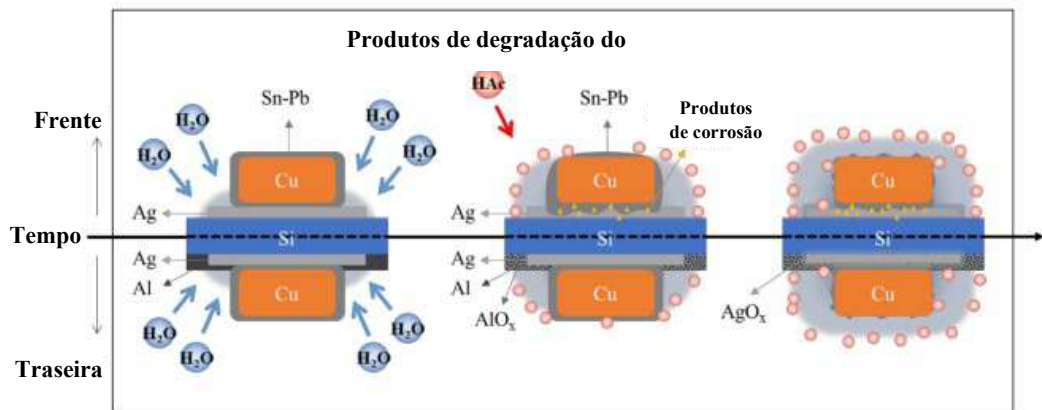
A corrosão ocorre principalmente com a entrada de umidade nos cantos laminados do módulo. Assim, a corrosão ataca as conexões metálicas do módulo, diminuindo a eficiência geral. O efeito de corrosão também degrada a adesão entre as células e os quadros metálicos, e é considerada o meio mais comum de degradação dos painéis solares, conforme ilustrado na Figura 12. O EVA se degrada sobre a presença de luz UV, umidade e calor, formando ácido acético. Este ácido, corrobora para o processo de corrosão da célula. Um sistema que representa este processo corrosão está representado na Figura 13 (AGHAEI, 2022; KIM, 2021; LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

Figura 12: Causa e efeito de corrosão no módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de KIM 2021

Figura 13: Passos da corrosão na parte fronteira e traseira de uma célula solar

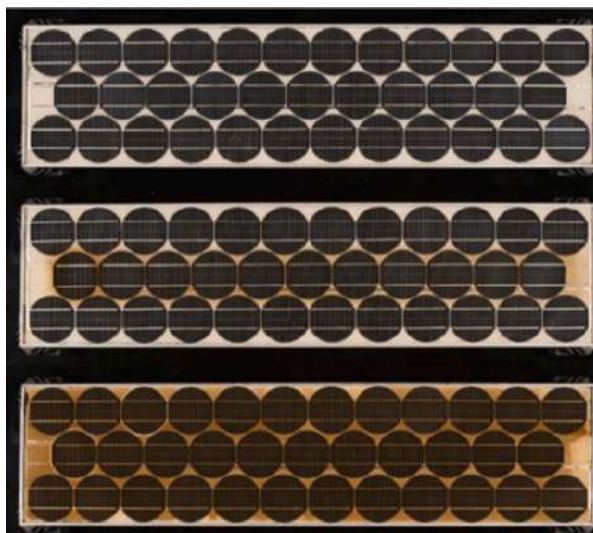


Fonte: Adaptado de KIM 2021

3.4.2. Descoloração

A descoloração geralmente ocorre com a degradação do encapsulante do módulo entre o vidro e as células fotovoltaicas. O material adesivo (geralmente o EVA) adquire uma cor amarelada ou até amarronzada (Figura 14), impedindo a penetração da radiação nas células e, assim, diminui a eficiência de absorção da radiação pelo módulo. Oreski e Wallner (2009) alegam que a principal causa de degradação do EVA são raios ultravioletas, combinados com água a mais de 50 °C (AGHAEI, 2022; NDIAYE, 2013).

Figura 14: Descoloração de módulos fotovoltaicos

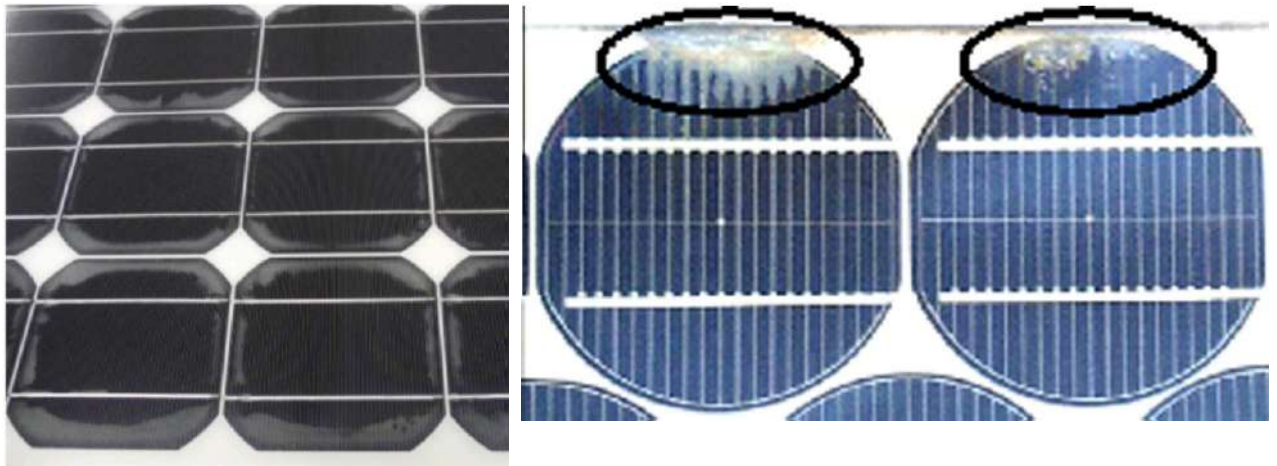


Fonte: AGHAEI, 2022

3.4.3. Delaminação

A delaminação também pode ser descrita como a perda de adesão entre o polímero de encapsulamento, a célula fotovoltaica e o vidro de cobertura. O problema da delaminação de um módulo fotovoltaico é que causa dois problemas principais: o aumento no índice de reflexão do painel e o aumento da penetração de água no módulo. Esse aumento da reflexão diminui a absorção de luz e possibilita o aumento da permeabilidade de água no módulo, podendo gerar outros meios de degradação. Este problema majoritariamente ocorre em painéis instalados em locais de climas úmidos e quentes, assim como de altitude considerada. Como os fatores principais da delaminação são causados por condições climáticas, localizações desérticas e com baixa variação de clima ao longo das estações são ideais para evitar a degradação desse tipo de célula. A Figura 15 ilustra os fenômenos de delaminação em células fotovoltaicas. Quando a delaminação ocorre nas extremidades do painel, há também os riscos elétricos para o módulo e a para a instalação, podendo gerar curtos e fuga de corrente (AGHAEI, 2022; KIM, 2021; LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

Figura 15: Exemplos de delaminação de células fotovoltaicas



Fonte: NDIAYE, 2013

3.4.4. Quebra e fissuras de células

A quebra ou a possível fissura da célula fotovoltaica é o método mais simples de degradação, que pode ocorrer durante as etapas de manutenções, instalações ou principalmente, durante a etapa de transporte. É válido destacar que, mesmo fissurada, uma célula fotovoltaica ainda pode funcionar. Entretanto o risco de choque elétrico ou infiltração de água aumentam nos componentes internos da célula. Ademais, com o afinamento de células fotovoltaicas, seja por eficiência ou redução de custos de produção, aumenta o risco de ocorrer uma fissura consideravelmente (AGHAEI, 2022; KIM, 2021; LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

3.4.5. Ponto de aquecimento

Os pontos de aquecimento podem ser gerados através de um aumento descontrolado de temperatura em certos pontos do painel fotovoltaico. Geralmente ocorrem por falta de conexão entre as células, incompatibilidade celular ou interferências celulares geradas por sombras fracionárias. Qualquer um destes efeitos acaba gerando uma sobrecarga em uma área específica da célula, aumentando a temperatura podendo começar a degradá-la, conforme ilustrado na Figura 16 (AGHAEI, 2022; KIM, 2021; LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

Figura 16: Exemplos de pontos de aquecimento de células fotovoltaicas



Fonte: KIM, 2021

3.4.6. Bolhas

O caso de formação de bolhas na camada interior do módulo tem um efeito similar a delaminação, porém, acaba tendo uma área de efeito assim como intensidade de degradação maior ainda. O aumento na quantidade de bolhas formadas internamente dificulta a célula solar a dissipar calor, aumentando a temperatura e diminuindo a vida útil. Geralmente são causadas por qualquer reação química que resulte na formação de gases que ficam retidos dentro do módulo (KIM, 2021; LAMEIRINHAS, 2022; NDIAYE, 2013).

3.4.7. Degradação induzida por potencial (PID)

As correntes entre as células fotovoltaicas podem acabar variando dentro de um mesmo módulo. Esta variação ocorre quando o módulo não está corretamente selado, podendo dessa forma, deixar escapar corrente para estrutura em que o painel se encontra. Este efeito pode acabar conduzindo incorretamente cátions que se encontram no vidro para a célula com a corrente gerada, gerando uma polarização do painel e levando a sua degradação. Este efeito também é intensificado em áreas mais úmidas (AGHAEI, 2022; KIM, 2021; NDIAYE, 2013).

3.5. SITUAÇÃO ECONÔMICA

A tecnologia de painéis fotovoltaicos tem se tornado cada vez popular entre o consumo populacional. Além de não produzir gases poluentes/contribuintes para o efeito estufa, e ser de fácil instalação, a energia fotovoltaica pode ainda gerar receita de acordo

com a RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 921, DE 23 DE FEVEREIRO DE 2021 (BRASIL, 2016). Isso ocorre pois efetivamente, qualquer energia gerada que não for utilizada pode ser vendida para a concessionária, sendo uma opção mais economicamente vantajosa em termos de proporção entre preço e energia, comparado aos meios energéticos já estabelecidos (usinas termoelétricas e hidroelétricas) (PALETTA, 2012).

Ademais, depois da publicação da portaria nº 50 de 2022, foi possível obter uma maior abertura deste mercado de energia além das concessionárias. Nela é estipulado que qualquer consumidor classificado como grupo A pode definir seu próprio fornecedor de energia em um limite de até 500kW. Isso gera uma maior competitividade e, consequentemente, um crescimento no mercado, gerando vantagens como o consumidor. Um exemplo de vantagem é que o consumidor pode optar por fornecedores que atendam em picos de energia em horários específicos (BRASIL, 2022).

No ano de 2024, como demonstrado na Figura 18, o Brasil apresenta 17,5% do consumo total de energia em energias fotovoltaicas. Sendo esse tipo, o segundo mais proeminente, somente perdendo para energia hídrica (48,3%) (ABSOLAR 2024).

Figura 17: Percentagem de cada fonte na matriz elétrica brasileira em 2024

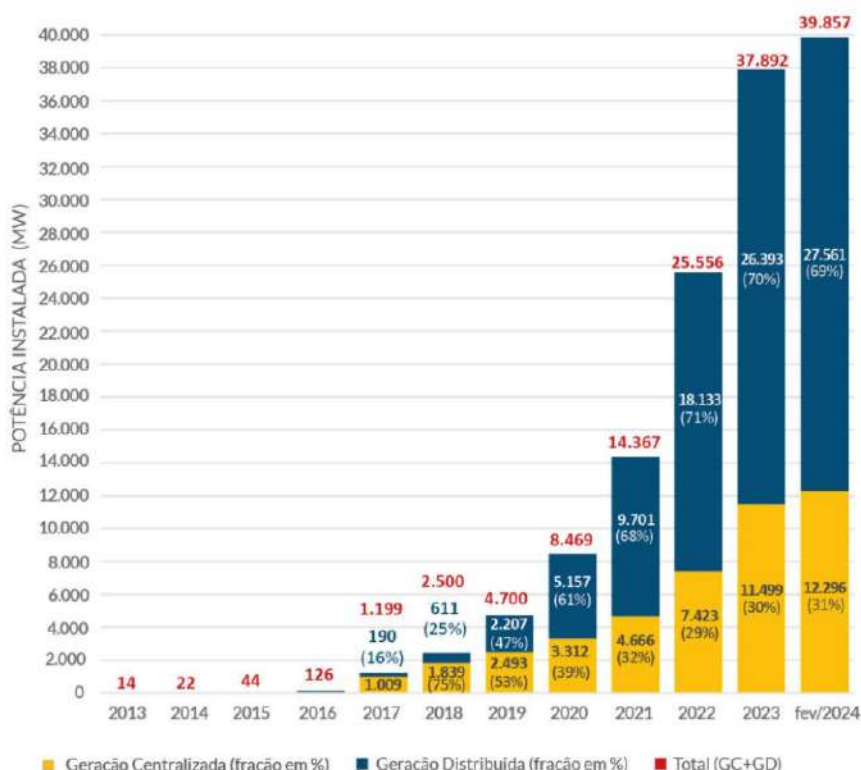


*A potência total da matriz não inclui a importação e segue critério aplicado pelo MME, que adiciona, nos valores de capacidade instalada, as quantidades de mini e microgeração distribuída associadas a cada tipo de fonte.

Fonte: ABSOLAR, 2024

O valor da energia gerada por fontes fotovoltaicas pode ainda ocupar uma maior percentagem na matriz elétrica brasileira, dado que desde 2013, a potência instalada no país, tem aumentado de forma exponencial, conforme mostra a Figura 19 (ABSOLAR 2024).

Figura 18: Evolução da energia fotovoltaica no Brasil ao longo dos anos



Fonte: ABSOLAR, 2024

No ano de 2013, somente 14 MW foram gerados no país, enquanto, em 2023, foram 37.892 MW de energia gerados (Figura 19). O crescimento de geração distribuída também representa uma maior diversificação de produção entre usinas de pequeno porte e entre a própria população.

Ainda pela Figura 19 é possível perceber que houve um grande crescimento da participação popular na geração de energia fotovoltaica, no qual em 2017, a geração distribuída somente correspondia a 16% da energia total gerada. Já no ano de 2021, correspondia a 68~71% da energia total gerada (NASSA, 2023).

Considerando que os módulos fotovoltaicos possuem vida útil de 25~30 anos em condições ideais, é possível que os painéis de primeira geração já tenham passado da meia vida operacional. Juntando o fato de a produção de novos painéis crescer a cada ano,

torna-se evidente a importância para um descarte adequado desse tipo de material. A RoHS (Restrictions of the use of Certain Hazardous Substances) é uma norma estabelecida na Europa que visa impedir o uso de metais tóxicos em equipamentos eletroeletrônicos. A partir da Instrução Normativa do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão nº 01/2010, o Brasil adota parcialmente a RoHS para seus produtos. Este fato acaba sendo conflitante por certos modelos de painéis fotovoltaicos possuírem estes metais (FARRELL, 2019; UNIÃO EUROPÉIA, 2011).

A norma da RoHS, entretanto, se estabelece inicialmente somente para equipamentos de pequeno porte. Porém existem países da União Europeia, assim como organizações, que desejam que a norma se estenda para qualquer tipo de equipamento eletrônico para se garantir uma segurança ambiental e populacional. Assim, se geram discussões, uma vez que caso isto ocorra, o mercado de energia fotovoltaica será limitado, enquanto o de fontes convencionais (como petróleo) voltará a ser proeminente (FARRELL, 2019; UNIÃO EUROPÉIA, 2011).

3.6. LEGISLAÇÃO SOBRE RECICLAGEM DE LIXO ELETRÔNICO

A legislação no Brasil voltada para a temática de resíduos sólidos é baseada na Lei Federal nº 12.305 de 2010, que aborda a Política Nacional de Resíduos Sólidos, regulamentada pelo Decreto Federal de nº 11.413, de 2023 no artigo nº33 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nela é especificado que todo produto eletroeletrônico deve apresentar um sistema estruturado e implementado de logística reversa por seu produtor, importador ou comerciante. Como o painel solar é classificado como um resíduo eletroeletrônico, portanto deve atender obedecer ao artigo nº33 (BRASIL, 2010; BRASIL, 2023).

A Norma ABNT nº 16.156, estabelece os padrões para elaborar os processos de logística reversa no caso de produtos eletroeletrônicos, especificando planejamento e segurança do trabalhador. Também indica quais materiais devem ser obrigatoriamente passivos de tratamento, dado seu alto nível de periculosidade. Destes materiais são relevantes para reciclagem de módulos fotovoltaicos: cádmio, gases fluorados, lítio, assim como os demais componentes que não são biodegradáveis (BRASIL, 2010).

A reciclagem de módulos é o meio principal de destinação, pelo fato de que os materiais de produção destes módulos são onerosos e os métodos de reciclagem geralmente possuem alta taxa de recuperação. Assim, muitas vezes é possível se reaproveitar os componentes de um painel solar para se criação de um novo painel.

Foi no ano de 2019, foi realizado o Acordo Setorial para a Logística Reversa de Eletroeletrônicos e a implantação de sistema de logística reversa. Este trabalho foi realizado por um grupo de empresas que se comprometeram a atender aos requisitos da PNRS (BRASIL, 2010, BRASIL, 2019).

No ano de 2022, o governo brasileiro instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), através do Decreto nº 11.043. Este plano tem como objetivo por finalmente em prática a PNRS, a partir de diretrizes, estratégias, ações e metas. As principais ações desse plano estão voltadas para a redução dos lixões em 50% dos tamanhos atuais em 20 anos, implementação da logística reversa, assim como a reciclagem de resíduos de construção civil, em pelo menos 25%. Para a realização do plano, foram realizadas várias consultas públicas em cada região, assim como uma audiência pública nacional. Foi estabelecido um horizonte de conclusão de 20 anos a fim de garantir segurança jurídica, previsibilidade e atração de investimentos (BRASIL, 2022).

4. METODOLOGIA

4.1. ANÁLISE SWOT DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS (REEE)

A análise SWOT ou análise FOFA é uma ferramenta que permite examinar e identificar as vantagens e as desvantagens de um certo processo, a partir de quatro padrões principais. Estes padrões estão definidos no nome dessa ferramenta de análise sendo: *strengths* (forças), *weakness* (fraquezas), *opportunities* (oportunidades) e *threats* (ameaças). Estes são avaliados por fatores internos ou externos, e fatores positivos ou negativos. Um exemplo de uma matriz SWOT pode ser visto na Quadro 2 (SARSBY, 2016).

Quadro 2: Esquema geral de matriz SWOT

	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores Internos	Forças	Fraquezas
Fatores externos	Oportunidades	Ameaças

Fonte: Autoral

Visto que muitos dos meios de reciclagem estudados neste trabalho possuem fatores em comum, foi realizado previamente uma compilação de fatores gerais. Estes foram obtidos a partir de revisão bibliográfica de artigos disponíveis em sites de periódicos e publicados em revistas científicas, além de dissertações, teses, livros técnicos, leis e normas brasileiras, sejam eles relacionados a painéis fotovoltaicos ou somente reciclagem de REEEs. Assim, após a compilação destes fatores, foi identificado qual método corresponderia a quais fatores para uma melhor caracterização desses.

Como é necessária a análise de mais vias além de simplesmente a SWOT para fazer um panorama completo da situação de cada tratamento, foi realizado um cruzamento de seus fatores. Assim, é possível a identificação de respostas estratégicas para cada um dos métodos que serão estudados na Seção 4 (LADEIRA, 2024; SARSBY, 2016). Esses cruzamentos resultam em: S-O (Crescimento), W-O (Desenvolvimento), S-T (Manutenção) e W-T (Sobrevivência), onde:

- Crescimento - A situação da estratégia está favorável e as forças presentes podem continuar a se destacar. Situação favorável a investimentos;
- Desenvolvimento - O principal objetivo é se aproveitar de oportunidades presentes e transformar as fraquezas em algo positivo por meio destas;
- Manutenção - A situação é de se não flutuar em seus padrões principais, se utilizando das forças internas para amenizar ameaças;
- Sobrevivência - O pior cenário possível, sendo necessário escolhas difíceis que necessitam a mudança completa ou abandono de processo;

Este cruzamento de fatores foi realizado a partir da soma da quantidade de fatores que cada método possuir. Sendo assim, o método que possuir uma grande quantidade de fatores força e oportunidades terá situação favorável em um cenário de crescimento (S + O), por exemplo.

Para se ter uma base de realização na produção das análises SWOT deste trabalho, será realizado nesta seção um estudo simples de parâmetros usados na avaliação de materiais eletroeletrônicos. Assim, será possível examinar quais fatores são corretamente considerados em suas seções e o que é relevante dado o tema. Um exemplo de matriz SWOT sobre REEEs pode ser representado na Figura 17 (NETO, 2023).

Figura 19: Análise SWOT modelo para REEE



Fonte: Adaptado de NETO, 2023

Como a maioria dos métodos que serão estudados já possuem em seus próprios trabalhos, pontos positivos e negativos de seu processo, foram estes usados como parâmetros de forças e fraquezas da matriz. As oportunidades e ameaças, portanto,

requerem um escopo mais amplo e, conseqüentemente, foram majoritariamente baseadas em trabalhos de tratamentos de Narooie (2017) e Ladeira (2024) de resíduos sólidos. Eles não referenciam diretamente reciclagens de painéis fotovoltaicos, mas apresentam indicadores válidos por abordarem SWOT de métodos de tratamento e ambientes na reciclagem de REEE's (LADEIRA, 2024; NAROOIE, 2017; SARSBY, 2016).

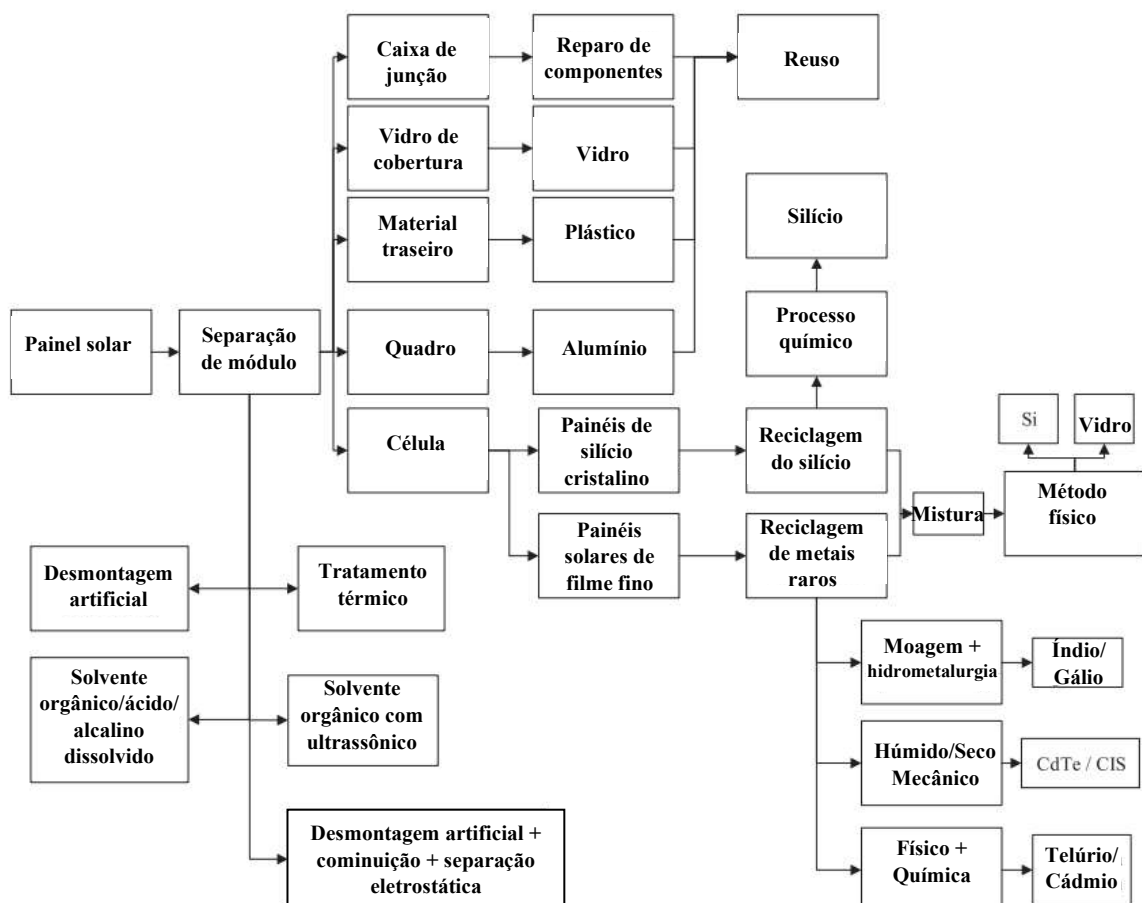
5. RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dado a complexidade de materiais e a quantidade de componentes, a reciclagem de um módulo fotovoltaico não pode ser definida, como um processo simples. Ele é dividido em duas etapas principais: a separação dos componentes, também podendo ser chamada de delaminação, e a separação de materiais. Geralmente, após a delaminação, componentes podem ser reutilizados na fabricação de outros painéis. Entretanto, como a maioria do fim de vida dos painéis é causada por degradações graves, é necessário a extração dos materiais destes componentes (DIVYA, 2023; XU, 2018).

A reciclagem de cada componente pode ser realizada principalmente para módulos que possuem células de primeira ou segunda geração, devido à sua padronização de estrutura geral. As possíveis rotas de reciclagem dos módulos fotovoltaicos são apresentadas na Figura 20. Neste trabalho serão somente focadas as rotas de delaminação, dado que são o ponto mais crítico do processo e a fim de não deixar o trabalho muito extensivo (DIVYA, 2023; XU, 2018).

Os painéis de terceira geração, apresentam uma variedade de composição e construção, comparado às de gerações anteriores, e, portanto, as rotas de reciclagens serão abordadas para alguns casos, de uma forma geral (DIVYA, 2023; XU, 2018).

Figura 20: Fluxograma das possíveis rotas de reciclagem de módulos fotovoltaicos



5.1. TRATAMENTO DE MÓDULO FOTOVOLTAICO

Existem quatro meios principais de tratamento dos módulos fotovoltaicos degradados e dos seus componentes. A separação de componentes físicos como o quadro de alumínio e a caixa de junções é mais simples, pois são construídos para terem fácil substituição, sendo o meio mais simples de resolução. Os meios de separação, portanto, focam na eliminação do EVA, uma vez que tanto em painéis de primeira geração quanto de segunda geração, é o componente que impermeabiliza o módulo por completo. (XU, 2018) As nações principais que estão investindo na reciclagem dos painéis solares são EUA, Japão e Europa (CHOWDHURY, 2020).

Os quatro meios de tratamento podem ser identificados principalmente como:

- Tratamento físico
- Tratamento térmico
- Tratamento químico
- Substituição de componentes defeituosos

Dentre estes quatro meios de tratamento, existem muitas variações de operação entre cada indústria, equipamentos e tipo de painel a ser reciclado. Portanto, serão abordados uma representação geral de cada método com suas etapas principais.

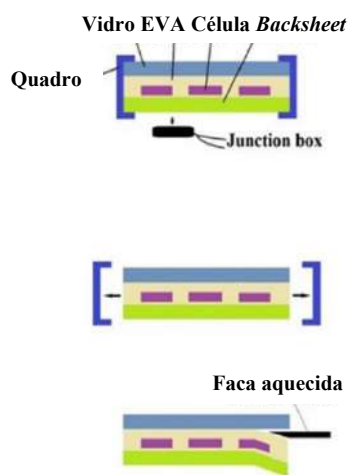
5.1.1. Tratamento físico

O tratamento físico é considerado de menor eficiência geral de recuperação de componentes dentre os demais. Apesar desta desvantagem, os processos, na maioria dos casos, possuem vantagens ambientais por geralmente não produzir resíduos complexos. Os tratamentos físicos conhecidamente distintos são: Método da faca quente, Britagem de painel fotovoltaico, Método de britagem de alta voltagem, Técnica de indução por *laser*, Técnica de cominuição e classificação seletiva. Em todos esses métodos, antes de serem aplicados os tratamentos em si, são removidos do módulo fotovoltaico antes, o quadro de alumínio e a caixa de junções (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; GHAREMANI, 2024; XU, 2018).

5.1.1.1. Método da faca quente

Foi desenvolvida inicialmente por uma companhia japonesa, no qual uma lâmina de metal aquecida a uma temperatura de 300° C corta o EVA, a fim de separar as células fotovoltaicas do vidro de cobertura. Todavia, como nesta temperatura não ocorre degradação total do EVA, a célula deve ser levada a uma refinaria, onde ocorre uma pirólise para a remoção do EVA. Assim, é possível a extração completa de componentes e da fiação de cobre do módulo. Por apresentar uma baixa eficiência de separação, necessita ainda da etapa de pirólise, para promover a total separação dos componentes, com a recuperação de 100% do vidro. Como este método não produz resíduos tóxicos e produz uma quantidade menor de CO₂ que outras técnicas, a logística de transporte à refinaria é responsável pela maioria do impacto ambiental. Na Figura 21 é ilustrado um esquema simples desse tipo de sistema (DIVYA, 2023; FRISCHKNECHT, 2023; GHAHREMANI, 2024).

Figura 21: Esquemática do método de faca quente



Fonte: Adaptado de GHAHREMANI, 2024

5.1.1.2. Britagem de painel fotovoltaico

A britagem do módulo consiste em simplesmente triturar por completo o módulo fotovoltaico. Podendo, em seguida, passar por um processo adicional de britagem criogênica para maior separação caso seja desejado. Após esse processo, ocorre uma separação eletrostática para separar frações recicláveis e não recicláveis. Apesar de ser um método direto e simples de tratamento, a parte principal da célula fotovoltaica não

sofre separação química. Portanto, muitas vezes parte do rejeito, que é separado, acaba se identificando como tóxico, dificultando em geral o processo de reciclagem (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; XU, 2018).

5.1.1.3. Método de trituração com pulso de alta voltagem

Este método consiste na realização de micro explosões ou ondas eletromagnéticas ao eletrodo de alumínio e ao substrato de silício. Em seguida é aplicada uma corrente de alta voltagem a fim de separar completamente o vidro e o *backsheet*. Os resultados deste método podem ser observados na Figura 22 (CHEN, 2023; GHAREMANI, 2024).

Figura 22: Produtos de método de pulso de alta voltagem em diferentes voltagens



Adaptado de GHAREMANI, 2024

5.1.1.4. Técnica de irradiação por *laser*

Neste método além da caixa de junção e o quadro de alumínio, inicialmente também é retirado o *backsheet*. É aplicada uma radiação a *laser* no painel fotovoltaico de maneira aos eletrodos de alumínio e prata absorverem sua energia. Com essa absorção,

há um aquecimento da célula fotovoltaica que enfraquece a adesão do EVA, tornando assim, sua remoção mais fácil (GHAHREMANI, 2024; LI, 2022).

5.1.1.5. Técnica de cominuição e classificação seletiva

Nesta técnica o módulo passa por uma etapa de fresagem. O painel é posto em um moinho de facas ou de martelos no qual é triturado e transformado em pó. Após esta etapa, passa por uma ou mais peneiras vibratórias, a fim de separar o pó em várias frações, no qual o vidro consegue ser completamente separado do resto dos compostos. Às vezes, ainda pode ser realizado um aquecimento para se aumentar o nível de recuperação de metais e vidro (DIAS, 2016; DIVYA, 2023).

5.1.2. Tratamento térmico

O tratamento térmico é realizado através da queima do módulo fotovoltaico para a remoção completa do EVA. Possui três variações, sendo: Queima comum, Expansão solvotérmico com decomposição térmica (SSTD) e Método eletrotérmico.

A queima comum engloba a maioria dos métodos existentes, tendo apenas pequenas variações entre eles. Geralmente é descrito com a inserção do módulo em fornos específicos que atinjam temperatura de pelo menos 450~600°C (a degradação do EVA ocorre em 350°C). Algumas pequenas variações incluem se a decomposição ocorre em forma de pirólise (podendo ser em leito fluidizado) ou combustão (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; TAO, 2015).

Geralmente essas variações de método, conseguem obter a recuperação de 91% do vidro do painel solar e, quando bem-sucedido, uma recuperação de até 98% da célula fotovoltaica (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; TAO, 2015).

A vantagem principal de todo tipo de tratamento térmico está associada na remoção do vidro de cobertura dos outros componentes de maneira fácil, podendo ser feita manualmente após o processo. Apesar do processo ser vantajoso, ele é delicado, em função da possibilidade de ocorrência de fissuras ou trincas na célula e no vidro, durante a etapa de separação, em função da quantidade de calor gerado (DIVYA, 2023).

5.1.2.1. Expansão solvotérmico com decomposição térmica (SSTD)

Neste método ocorre o aquecimento do módulo em um reator solvotérmico. O procedimento se inicia quando o painel é inserido no reator já preenchido com um solvente orgânico. O reator é, então, aquecido a fim de se formar vapor do solvente orgânico e inchar o EVA presente no módulo. Assim, com a expansão, há um descolamento entre o vidro e a célula fotovoltaica. Depois do procedimento o painel é inserido em um forno comum para a retirada de qualquer EVA remanescente (XU, 2021).

5.1.2.2. Método eletrotérmico

O processo térmico de perdas dielétricas é baseado no efeito térmico de um campo magnético alternado em um material dielétrico. O sistema atua como um capacitor e o calor gerado nos materiais dielétricos é devido a perdas de energia dielétrica causadas pela polarização dos materiais e às correntes de condução (DONI, 2012).

A realização deste método consiste em amostras do painel solar serem inseridas entre os dois eletrodos e uma pressão é aplicada ao eletrodo superior. Durante o processo ocorre um aquecimento, que permite transmitir a melhor potência de RF para as amostras, mantendo a tensão aplicada inferior ao valor necessário na presença de um entreferro (DONI, 2012).

A principal vantagem deste processo, em comparação com outros processos térmicos, se encontra na possibilidade de aquecer uniformemente o dielétrico (DONI, 2012).

5.1.3. Tratamento químico

Este tratamento geralmente se utiliza de soluções ácidas, alcalinas ou orgânicas, que tem poder degradante no EVA. Portanto, todos eles envolvem a imersão do módulo ao longo de um período pré-determinado de tempo. Os tratamentos químicos distintamente conhecidos são: Método de submersão com solvente orgânico, Método de submersão com auxílio de ultrassom, Submersão com solvente inorgânico e Submersão com CO₂ supercrítico (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; XU, 2018).

5.1.3.1. Método de submersão com solvente orgânico

Este tipo de tratamento ocorre a partir do emprego de solventes orgânicos. O método mais básico é a inserção do painel em uma solução de tricloroetileno a 80°C, para promover a separação do EVA (DOI, 2001). Apesar de conseguir a separação sem nenhum dano à sílica, o processo demora por volta de 10 dias para dissolver completamente o EVA (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023).

5.1.3.2. Método de submersão com auxílio de ultrassom

Este método foi estudado por Kim e Lee (2012). Ele se baseia no uso de solventes orgânicos, como tricloroetileno, o-diclorobenzeno, benzeno e tolueno para solubilizar o EVA. Ademais durante todo o processo de submersão foi inserida uma força ultrassônica no meio para acelerar o processo. Ao aplicar uma potência de 450W, e uma temperatura de meio de 70 °C, o EVA é completamente dissolvido em 3,0 mol. L⁻¹ de tolueno, por um período de 1 hora (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; XU, 2018).

Apesar de extrair o EVA sem danos à célula, o método acaba produzindo efluentes halogenados, tornando o descarte apropriado necessário (CHOWDHURY, 2020; DIVYA, 2023; XU, 2018).

5.3.2.3. Método de submersão com inorgânico

Este método se utiliza da imersão de módulos em soluções de KOH ou NaOH em vez de compostos orgânicos. Isso permite uma remoção não só do EVA, mas uma extração parcial também de alumínio e silício das células fotovoltaicas a partir da separação de camadas. Na aplicação da técnica, módulos são imersos em um recipiente hidrotérmico de 200 ml, chaleira contendo uma solução alcalina-etanol de uma concentração conhecida, que é colocada em um forno mufla. Após um certo tempo de reação, os módulos são retirados, lavados cuidadosamente e secos a 130°C (YAN, 2020).

5.3.2.4. Método de submersão com CO₂ supercrítico

A proposta desse método é a eliminação do EVA através da submersão do painel em uma atmosfera supercrítica de CO₂, controlada em um reator. Esta ideia foi realizada a fim de eliminar os problemas de toxicidade e tempo dos outros métodos.

Os módulos são cortados com tesoura de metal, previamente pesados e colocados em um reator de aço inoxidável. O reator é conectado a uma bomba de pressão acoplada a um cilindro de dióxido de carbono (99,5%), a fim de controlar o sistema para atingir os valores desejados de operação. É feito o aquecimento em banho de óleo para operar em temperaturas acima de 100 °C. A despressurização do sistema utiliza uma válvula localizada abaixo do reator, sendo os componentes separados extraídos e o solvente recuperado (LOVATO, 2021).

5.1.4. Substituição de componentes defeituosos

Apesar de não ser considerado oficialmente um meio de tratamento, ainda assim é importante por ser uma finalidade válida para o módulo fotovoltaico. Pode ser empregado quantas vezes o painel resistir ao processo de recuperação dos componentes avariados. Efetivamente não possui separação de componentes ou reciclagem, sendo substituído somente os componentes eletrônicos do módulo avariados. É possível que após esgotadas as possibilidades das substituições, os módulos fotovoltaicos ainda possam ser tratados por uma das técnicas já mencionadas (DIVYA, 2023).

A grande maioria dos módulos fotovoltaicos é construído para os componentes da caixa de junção e seus fios serem removíveis. Assim, caso haja alguma falha no painel e seja identificado que essa falha pertence a algum desses componentes, realiza-se a substituição deles. Esse tipo de estratégia é uma solução de curto prazo, na qual o proprietário do módulo fotovoltaico acaba produzindo uma quantidade maior de resíduo eletroeletrônico, e fica exposto à flutuação de preço no mercado das peças sobressalentes de reposição (DIVYA, 2023).

5.2. TABELA DE DADOS DE MÉTODOS DE TRATAMENTO

Como anteriormente explicado, existem uma série de variações possíveis em cada meio de tratamento. Portanto, nos Quadros 3, 4 e 5 serão compilados métodos adquiridos em trabalhos e bibliografias com algum de seus dados pertinentes.

Quadro 3: Compilação de tratamentos físicos

Tratamento	Método	Princípio de funcionamento	Geração dos módulos	Recuperação	Artigo referencia
Físico	Faca quente	Separação o vidro da camada EVA/célula com um cortador aquecido 50s	1ª	-	GHAHREMANI, 2024; PREET, 2024; KO, 2022
	Fragmentação eletrohidráulica	Reator EHF com capacidade de 2 L cheio de água. 600 J de energia para gerar cada impulso de onda de choque e duas durações de impulso diferentes de 300 e 500 a uma taxa de 1 impulso por segundo	1ª	99% Cu, 60% Ag, 80% Pb/Sn/Al	KO, 2023
	Irradiação por laser	Os eletrodos de alumínio e prata presentes no EVA absorvem a energia pulsada do laser. Aumento da temperatura do EVA/célula. Enfraquecimento da força adesiva na parte traseira do EVA	1ª	-	TAO, 2015; KO, 2023
	Moagem	Uma trituradora para quebrar o vidro pedaços grandes e um moinho de martelo para esmagar o vidro	1ª e 2ª	vidro quebrado em peças de 4–5 mm.	CHOWDHURY, 2020; TAO, 2015; DIVYA, 2023
	Moinho de martelo	Britagem em etapas em um dispositivo móvel com moinhos de martelo	1ª e 2ª	-	GHAHREMANI, 2024; MAANI, 2020D; KO, 2023
	Rotores de duas lâminas com cominuição triplo	Foram realizadas três britagens sucessivas (britagem tripla) em um britador de rotores (DR120/360, Eslováquia) sem qualquer peneira de controle	1ª e 2ª	Frações de Vidro	KO, 2023;
	Trituração com pulso de alta tensão	Microexplosões no eletrodo de alumínio e substrato de silício, que separa as camadas de vidro e <i>backsheet</i> . Posteriormente, um pulso de alta tensão é aplicado à camada de vidro, resultando na separação do vidro e do eletrodo.	1ª	Vidro 45–850 µm; Pequenas impurezas de Si	GHAHREMANI, 2024; CHEN, 2023; KO, 2023; PREET, 2024;
	Britagem criogênica com separação eletrostática	-	1ª	68.6% Cu (99% purity)	KO, 2023
	Triturador de dois rotores seguido de britagem de martelo	Britador de dois rotores de pás (DR120/360, Eslováquia) sem qualquer peneira de controle e em um britador de martelo (SK 600, Eslováquia) usando uma peneira de 5 mm	1ª e 2ª	80 - 85% Frações de Vidro (em massa)	GHAHREMANI, 2024; CHOWDHURY, 2020; TAO, 2015; KO, 2023; CHEN, 2023; PREET, 2024

Fonte: Autoral

Quadro 4: Compilação de tratamentos físicos

Tratamento	Método	Princípio de funcionamento	Geração dos módulos	Recuperação	Artigo referencia
Térmico	Expansão solvotérmico com decomposição térmica (SSTD)	Reator solvotérmico teve pré-tratamento com 200ml de solvente orgânico. Ocorre aquecimento para formar vapor do solvente orgânico. Reator para decomposição/combustão do EVA (190 °C, 2 h e 0.2 M tolueno).	1ª	86.11% de Si	GHAHREMANI, 2024
	Mecânico/térmico	Pré-tratamento com moagem. Forno tubular Lenton com fluxo de ar de 24L/h. Aquecimento do forno em 450, 500 ou 600°C em taxa de 450°C/h por 1 hora.	1ª	Vidro 71,20%, Silício 6,37%, Metais 1,35%, Estrutura de alumínio 11,03%, Fita 0,51%, Folha traseira/EVA 9,54%. Porcentagem da massa total	GHAHREMANI, 2024
	Combustão em dois estágios	Forno a 330°C por 30 min e depois 400°C a 120 min	1ª e 2ª	-	CHOWDHURY, 2020; TAO, 2015; GHAHREMANI, 2024; KO, 2023
	Combustão	(550 °C, 5 °C/min, 2 h)	1ª	Total da célula	KO, 2023
		(480 °C, 15 °C/min, 1 h)	1ª	-	KO, 2023
		O gás foi fornecido a uma vazão de 24 L/h, depois o reator foi aquecido até a temperatura do processo (500°C) na taxa de aquecimento de 450°C/h, e finalmente mantido nesta temperatura por 1 h.	1ª	-	KO, 2023
		(650 °C, 30 min)	1ª	-	KO, 2023; PREET, 2024
	Pirólise em dois estágios	<i>Backsheet</i> foi removida por aquecimento a 150°C por 5 min - O ligante EVA foi eliminado por aquecimento a 500°C	1ª	Remoção total do EVA	KO, 2023; PREET, 2024
	Pirólise	Forno de correia transportadora, reator de leito fluidizado, 450 °C	1ª	-	KO, 2023; PREET, 2024
		Pirólise com gás inerte	1ª	-	PREET, 2024
		Forno de 20 a 500°C com taxa de 10°C/min	1ª	-	GHAHREMANI, 2024;
	Eletrotérmico	Aquecimento RF a 400 W	1ª	Remoção do EVA, pedaços de vidro	KO, 2023

Fonte: Autoral

Quadro 5: Compilação de tratamentos físicos

Tratamento	Método	Princípio de funcionamento	Geração dos módulos	Recuperação	Artigo referencia
Químico	Solvente orgânico (Hexano)	70°C em 24h	1ª	79,7% do Eva dissolvido	GHAHREMANI, 2024; KO, 2023
	Solvente orgânico (Tricloroetileno)	Imersão em tricloroetileno, deixadas em temperatura ambiente por 10 dias. Expansão de EVA	1ª	-	GHAHREMANI, 2024; CHOWDHURY, 2020; KO, 2023
	Solvente orgânico (o-diclorobenzeno)	120°C durante uma semana, sem danos, sem expansão	1ª	-	GHAHREMANI, 2024; KO, 2023
	Solvente orgânico (Tolueno)	210 min, 89.85°C	1ª	100% de recuperação dos componentes individuais. As purezas do vidro, dos filamentos metálicos de Pb e da folha protetora foram de $77 \pm 0,73\%$, $81,5 \pm 0,24\%$ e $89,2 \pm 0,27\%$, respectivamente.	GHAHREMANI, 2024
		2d a 90 °C	1ª	-	KO, 2023
		30 min a 110°C	1ª	-	KO, 2023
	Solvente orgânico (ScCO2 com tolueno)	180 °C, 45 min, S/L ratio de 1/12, e 75 bar	1ª	100% vidro, filamentos de chumbo e <i>backsheet</i> , com purezas de $84,61 \pm 1,29\%$, $92,07 \pm 0,37\%$ e $93,55 \pm 2,65\%$,	GHAHREMANI, 2024
	Solvente Inorgânico (KOH com etanol)	200°C, com concentração alcalina de 0,2 mol/L e módulos fotovoltaicos de tamanho 1 x 1 cm².	1ª e 2ª	-	GHAHREMANI, 2024
	Solvente Inorgânico (NaOH com etanol)	200°C, concentração de alcalina 0.2 mol/L, tamanho do módulo PV 1 x 1 cm².	1ª e 2ª	-	PREET, 2024
	Solvente orgânico (Ciclohexano)	Direção magnética 50°C	1ª e 2ª	-	GHAHREMANI, 2024
	Irradiação ultrassônica tolueno	Dissolução do EVA a 70°C em tolueno 3 M; no entanto, a célula fotovoltaica apresentou várias rachaduras. 450W	1ª	100% Eva dissolvido	CHOWDHURY, 2020; TAO, 2015;
	Irradiação ultrassônica o-diclorobenzeno	3 M O-DCB, taxa de dissolução do EVA aumentou dramaticamente com o aumento da temperatura. 70 °C e uma potência de irradiação de 900 W a dissolução completa do EVA em 30 min	1ª	77,7% do Eva dissolvido	GHAHREMANI, 2024

Fonte: Autoral

6. ANÁLISE SWOT DE MEIOS DE RECICLAGEM

Para realização da análise SWOT é necessária uma listagem de aspectos técnicos e ambientais de cada processo, a fim de identificar qual seria mais vantajoso em uma economia circular.

A lista das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças são indicadas nos Quadros 6, 7, 8 e 9, considerando os possíveis aspectos positivos e negativos, fatores internos e externos. Assim, cada método unicamente diferenciável afunilará estes fatores em sua análise SWOT no Quadro 10. As citações realizadas nas comparações com outros métodos, foram fundamentais para subsidiar as justificativas apresentadas para cada um dos subíndices do quadrante da Matriz.

Quadro 6: Forças do ambiente interno das técnicas de tratamento

Forças (S)
Tratamento Físico: S1 - Tratamento simples de resíduos gerados (CHOWDHURY, 2020) S2 - Separação possível em vários resíduos (CHOWDHURY, 2020) S3 - Não há emissão de efluentes tóxicos no ambiente (TAO, 2015) S4 - Remoção fácil de EVA (TAO, 2015; AKIMOTO, 2018) S5 - Recuperação do vidro (TAO, 2015; AKIMOTO, 2018) S6 - Pode ser utilizado com qualquer tamanho ou formato de módulo (TAO, 2015) S7 - Economicamente viável (AKIMOTO, 2018)
Tratamento Térmico: S1 - Eliminação total do EVA (CHOWDHURY, 2020) S2 - Possível recuperação da célula fotovoltaica completa (CHOWDHURY, 2020) S3 - Pode receber um volume considerável de painéis fotovoltaicos em uma mesma operação S4 - Recuperação da célula fotovoltaica com integridade alta (XU, 2021) S5 - Alta repetitividade por solvente orgânico não se degradar (XU, 2021) S6 - Sem chance de quebra da célula (DONI, 2012) S7 - Fácil remoção de vidro mesmo se quebrado (DONI, 2012)
Tratamento Químico: S1 - Remoção quase total da camada de EVA (CHOWDHURY, 2020) S2 - Reutilização de Solvente possível (CHOWDHURY, 2020) S3 - Separação simples do EVA (CHOWDHURY, 2020) S4 - Aceleração considerável do processo para algumas horas (CHOWDHURY, 2020) S5 - Remoção total da camada de EVA (CHOWDHURY, 2020) S6 - Oxida menos a célula solar que métodos térmicos (YAN, 2020) S7 - Não produção de efluentes tóxicos (LOVATO, 2021)

Fonte: Autoral

Quadro 7: Fraquezas do ambiente interno das técnicas de tratamento

Fraqueza (W)
Tratamento Físico: W1 - Geração de ruído considerável (TAO, 2015) W2 - Baixa qualidade de separação, misturando metais tóxicos com outros componentes (TAO, 2015) W3 - Desgaste elevado de equipamentos W4 - Equipamentos caros W5 - A maioria dos métodos encontra-se em escala laboratorial W6 - Produção de poeira tóxica (CHOWDHURY, 2020) W7 - Possível quebra da célula fotovoltaica (KO, 2023) W8 - Não funciona caso o módulo esteja previamente fisicamente danificado (TAO, 2015) W9 - Processo lento (TAO, 2015) W10 - Necessário controle de processo (LI, 2022) W11 - Somente funciona no EVA traseiro (LI, 2022)
Tratamento Térmico: W1 - Alto gasto energético (CHOWDHURY, 2020) W2 - Emissões de GEE (CHOWDHURY, 2020) W3 - Emissão de ácido fluorídrico (HF) caso o <i>backsheet</i> não seja removido (KO, 2023) W4 - Necessita de controle de temperatura (KO, 2023) W5 - Equipamento caro (DONI, 2012) W6 - Necessário altíssimo nível de controle de operação (XU, 2021)
Tratamento Químico: W1 - Tempo de delaminação depende da área do módulo (CHOWDHURY, 2020) W2 - Tempo de delaminação consideravelmente longo (CHOWDHURY, 2020) W3 - Manuseio de soluções perigosas à saúde humana (CHOWDHURY, 2020) W4 - Pode depender de tratamento secundário por não remoção total do EVA (CHOWDHURY, 2020) W5 - Caso não haja controle de expansão, quebra de célula fotovoltaica (TAO, 2015) W6 - Presença obrigatória de etanol na solução (YAN, 2020) W7 - Emissão de óxidos poluentes e gases (LOVATO, 2021) W8 - Formação de resíduos halogenados (CHOWDHURY, 2020) W9 - Equipamento caro (LOVATO, 2021) W10 - Alto controle de processo necessário (LOVATO, 2021)

Fonte: Autoral

Quadro 8: Oportunidades do ambiente externo das técnicas de tratamento

Oportunidades (O)
Tratamento Físico: O1 - Maioria dos processos funciona com módulos de 1ª e 2ª geração O2 - Mais viável economicamente (NAROOIE, 2017) O3 - Não necessita de insumos, somente equipamentos (NAROOIE, 2017) O4 - Menor escala, fácil aplicabilidade (NAROOIE, 2017)
Tratamento Térmico: O1 - Apresenta a maior probabilidade de manter a célula e vidro intactos (CHEN, 2023) O2 - Não há geração de efluentes tóxicos (GHaleB, 2023) O3 - Como reciclagem de painéis é muito caro, poder reciclar em bulk é vantajoso em relação aos outros métodos (NAROOIE, 2017) O4 - Oportunidade de crescimento com tecnologias verdes de aquecimento (NAROOIE, 2017) O5 - Possíveis colaborações com indústrias de energia para reduzir custos de energia (NAROOIE, 2017) O6 - Estudos estão sendo realizados para verificar viabilidade do método em módulos de segunda geração (DONI, 2012)
Tratamento Químico: O1 - Possibilidade de reutilização da solução (NAROOIE, 2017) O2 - Possível reutilização de célula fotovoltaica (CHOWDHURY, 2020) O3 - Possibilidade de crescimento com pesquisa e desenvolvimento de solventes menos tóxicos e mais sustentáveis. (NAROOIE, 2017)

Fonte: Autoral

Quadro 9: Ameaças do ambiente externo das técnicas de tratamento

Ameaças (T)
Tratamento Físico: T1 - Baixa comercialização comparados ao químico e térmico (CHOWDHURY, 2020) T2 - Não existe meio de recuperação da célula para reutilização (TAO, 2015) T3 - Necessidade de tratamento adicional para separação mais pura de componentes (TAO, 2015) T4 - Manutenção elevada, em função do desgaste dos equipamentos (NAROOIE, 2017) T5 - Marco legal da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº12.305/2010 (BRASIL, 2010) T6 - Escala de bancada (NAROOIE, 2017)
Tratamento Térmico: T1 - Vulnerável à variação de mercado de energia (GHaleB, 2023) T2 - Resolução CONAMA 316/2002 - estabelece parâmetros para emissões atmosféricas (BRASIL, 2002) T3 - Escala laboratorial (DONI, 2012)
Tratamento Químico: T1 - Nem sempre consegue degradar completamente o EVA, sendo menos eficiente que demais métodos (GHaleB, 2023) T2 - Devido à resolução do CONAMA 430/11 é necessário tratamento cuidadoso de efluentes (BRASIL, 2011) T3 - Equipamentos caros (CHOWDHURY, 2020) T4 - Necessidade de cuidado no manuseio e medidas de segurança rigorosas devido à toxicidade dos solventes (NAROOIE, 2017) T5 - Vulnerável à variação de mercado de solventes (NAROOIE, 2017)

Fonte: Autoral

Nos Quadros 6, 7, 8 e 9, foram identificados, de modo geral, os indicadores necessários para a realização de uma matriz SWOT, baseando-se em cada tipo de tratamento. Porém, como foi mostrado na sessão de reciclagem, existem especificações que distinguem cada método mesmo dentro de uma única categoria de tratamento. Serão, portanto, realizadas matrizes SWOT de cada tratamento unicamente identificado, se utilizando dos possíveis fatores citados. No Quadro 10 cada fator definido na matriz SWOT corresponde especificamente a seu meio de tratamento. Isto significa que, por exemplo, apesar das forças dos tratamentos físicos e químicos serem classificados como S, eles são subfatores diferentes conforme cada subdivisão dos quadros 6, 7, 8 e 9.

Quadro 10: Matriz SWOT de todos os métodos distintamente únicos de tratamento

	Positivos		Negativos	
Interno	Forças (S)		Fraquezas (W)	
	Físico		Físico	
	Faca Quente: S1, S2, S3, S4, S5, S6	Pulso de Alta Tensão: S1, S2, S3, S4, S5, S7	Faca Quente: W1, W3, W4, W5, W7, W8	Pulso de Alta Tensão: W1, W4, W5, W7
	Britagem/Moagem: S1, S2, S3	Laser: S1, S2, S3, S5, S7	Britagem/Moagem: W1, W2, W3, W4, W6, W7	Laser: W4, W5, W7, W8, W10, W11
	Térmico		Térmico	
	Combustão/Pirólise: S1, S2, S3	Eletrotérmico: S1, S3, S6, S7	Combustão/Pirólise: W1, W2, W3, W4	Eletrotérmico: W1, W4, W5
	SSTD: S1, S2, S3, S4, S5	-	SSTD: W1, W2, W4, W5, W6	-
	Químico		Químico	
	Solvente Orgânico: S1, S2, S3	Solvente Inorgânico: S1, S2, S3, S4, S6	Solvente Orgânico: W1, W2, W3, W4, W5	Solvente Inorgânico: W1, W2, W6, W7
	Ultrassom: S2, S3, S4, S5	CO2 Supercrítico: S1, S2, S3, S4, S7	Ultrassom: W1, W2, W5, W8, W9	CO2 Supercrítico: W1, W3, W5, W9, W10
Externo	Oportunidades (O)		Ameaças (T)	
	Físico		Físico	
	Faca Quente: O2, O3	Pulso de Alta Tensão: O2, O3, O4	Faca Quente: T1, T3, T4, T5	Pulso de Alta Tensão: T1, T3, T4, T5, T6
	Britagem/Moagem: O1, O2, O3, O4	Laser: O2, O3, O4	Britagem/Moagem: T1, T2, T3, T4, T5	Laser: T1, T3, T4, T5, T6
	Térmico		Térmico	
	Combustão/Pirólise: O1, O2, O3, O4, O5	Eletrotérmico: O2, O3, O4, O5, O6	Combustão/Pirólise: T1, T2	Eletrotérmico: T1, T2, T3
	SSTD: O1, O2, O3, O4, O5	-	SSTD: T1, T2	-

Químico		Químico	
Solvente Orgânico: O1, O2, O3	Solvente Inorgânico: O1, O2, O3	Solvente Orgânico: T1, T2, T4, T5	Solvente Inorgânico: T1, T2, T4, T5
Ultrassom: O1, O2, O3	CO2 Supercrítico: O1, O2, O3	Ultrassom: T1, T2, T3, T4, T5	CO2 Supercrítico: T1, T2, T3, T4, T5

Fonte: Autoral

Como foi explicado na seção de metodologia, para identificar os cenários citados no Quadro 11, foi necessário a soma da quantidade de fatores identificados nos subíndices do Quadro 10. Assim, no Quadro 11, em cada seção, foram identificadas a quantidade de fatores chave de cada método, para o cenário específico, assim como o valor de sua soma.

Quadro 11: Tabela de cruzamento da matriz SWOT

		Externo	
		Oportunidades (O)	Ameaças (T)
Interno	Forças (S)	Quadrante 1: S + O	Quadrante 2: S + T
		Faca Quente: $6S + 3O = 9$ Pulso de Alta Tensão: $6S + 4O = 10$ Britagem/Moagem: $3S + 4O = 7$ Laser: $5S + 3O = 8$ Combustão/Pirólise: $3S + 5O = 8$ Eletrotérmico: $4S + 6O = 10$ SSTD: $5S + 5O = 10$ Solvente Orgânico: $3S + 3O = 6$ Solvente Inorgânico: $5S + 3O = 8$ Ultrassom: $4S + 3O = 7$ CO2 Supercrítico: $5S + 3O = 8$	Faca Quente: $6S + 5T = 11$ Pulso de Alta Tensão: $6S + 5T = 11$ Britagem/Moagem: $3S + 5T = 8$ Laser: $5S + 5T = 10$ Combustão/Pirólise: $3S + 2T = 5$ Eletrotérmico: $4S + 3T = 7$ SSTD: $5S + 2T = 7$ Solvente Orgânico: $3S + 5T = 8$ Solvente Inorgânico: $5S + 5T = 10$ Ultrassom: $4S + 5T = 9$ CO2 Supercrítico: $5S + 5T = 10$
	Fraquezas (W)	Quadrante 3: W + O	Quadrante 4: W + T
		Faca Quente: $6W + 3O = 9$ Pulso de Alta Tensão: $4W + 4O = 8$ Britagem/Moagem: $6W + 4O = 10$ Laser: $6W + 3O = 9$ Combustão/Pirólise: $4W + 5O = 9$ Eletrotérmico: $3W + 6O = 9$ SSTD: $5W + 5O = 10$ Solvente Orgânico: $5W + 3O = 8$ Solvente Inorgânico: $4W + 3O = 7$ Ultrassom: $5W + 3O = 8$ CO2 Supercrítico: $5W + 3O = 8$	Faca Quente: $6W + 5T = 11$ Pulso de Alta Tensão: $4W + 5T = 9$ Britagem/Moagem: $6W + 5T = 11$ Laser: $6W + 5T = 11$ Combustão/Pirólise: $4W + 2T = 6$ Eletrotérmico: $3W + 3T = 6$ SSTD: $5W + 2T = 7$ Solvente Orgânico: $6W + 5T = 10$ Solvente Inorgânico: $4W + 5T = 9$ Ultrassom: $5W + 5T = 10$ CO2 Supercrítico: $5W + 5T = 10$

Fonte: Autoral

Ao analisar os Quadros 10 e 11 foi possível observar que :

- Quadrante 1 - Crescimento:

Apesar de por motivos diferentes, os três tipos de tratamentos se encontram com valores parecidos em média, sendo preferencialmente, os tratamentos térmico (9,3), físico (8,5) e, finalmente, químico (7,25).

Os tratamentos químico e físico possuem mais forças do que oportunidades, indicando que apesar de serem métodos com bastantes vantagens, não são tão fortes em comparação ao térmico e/ou não tem tanta oportunidade de crescer no ambiente atual brasileiro.

Os tratamentos térmicos, portanto, apresentam valores maiores ou iguais de oportunidades em relação as suas forças, indicando que, em média, tem a maior possibilidade de crescimento por suas vantagens e ambiente favorável.

Os métodos que apresentam maior chance de crescimento dentre os tratamentos citados foram: Pulso de alta tensão, eletrotérmico e SSTD.

- Quadrante 2 - Manutenção:

Neste cenário, as médias que possuem valores parecidos são somente dos tratamentos de químico (9,25) e físico (10), enquanto o tratamento térmico (6,3) se encontra com valores bem mais baixos.

Tal justifica ocorre em função de, apesar de terem forças bem estabelecidas, os tratamentos químico e físico possuem maiores dificuldades em relação aos fatores externo ambiental e de mercado por terem grandes problemas com equipamentos caros e resíduos/efluentes tóxicos.

Em contrapartida, tratamentos térmicos não possuem tantas barreiras assim por terem equipamentos simples (em sua maioria) e, como emitem somente GEEs (geralmente) durante a operação, não possuem tantas ameaças. Assim, o tratamento térmico é o que menos se encaixa em um cenário de manutenção.

Os métodos que apresentam maior necessidade de manutenção para eliminar ameaças são: Faca quente e Pulso de alta tensão.

- Quadrante 3 – Desenvolvimento:

Novamente os três tipos de tratamento possuem médias aritméticas parecidas, seguindo, a ordem de melhor para pior de: tratamento térmico (9,3), tratamento físico (9,0) e tratamento químico (7,75).

Apesar de ambos os quadrantes 3 e quadrante 1 parecem similares em conceito, porém, existe um fator importante que o quadrante 3 consegue indicar: a oportunidade de eliminar fraquezas. Isso é explicado pelo fato dos tratamentos físicos, apesar de até agora terem sempre sido categorizados como os mais fracos, estão superiores aos tratamentos químicos, uma vez que eles possuem mais oportunidades para poder eliminar suas fraquezas.

Muitos dos tratamentos físicos ainda estão em fases laboratoriais e podem conseguir se desenvolver para eliminar a grande quantidade de fraquezas que possuem. O tratamento químico, apesar de não possuir tantas fraquezas, já está bem estabelecido, não tendo tantas oportunidades de desenvolvimento.

O tratamento térmico se encontra na dianteira deste setor por ainda possuir boas oportunidades de crescimento e desenvolvimento enquanto possui poucas fraquezas em comparação aos demais tratamentos.

Os métodos que possuem maior espaço para o seu desenvolvimento são: Britagem/Moagem e SSTD.

- Quadrante 4 – Sobrevivência:

Neste cenário os tratamentos químico (9,75) e físico (10,5) se encontram com valores parecidos em média. Como é um cenário negativo, se torna superior o tratamento que tiver menor pontuação em média, sendo o tratamento térmico (6,3) com o de menor média.

Assim, dado o atual ambiente brasileiro, um método térmico possui a maior chance de sobrevivência dentre os três, já que possui a menor

quantidade de fraquezas e ameaças. Isso demonstra que, dependendo da situação e da localização, os métodos físicos e químicos podem não ter utilizações viáveis.

Os métodos que mais necessitam reavaliados para aplicação são: Faca quente, Britagem/Moagem e Laser.

A partir da avaliação dos quatro quadrantes, pode-se dizer que, em geral, os tratamento físico e o químico, independente de qual método, apresentaram maior dificuldade de se estabelecer no Brasil. No entanto, isso não indica que devam ser completamente descartados, uma vez que possui desenvolvimento suficiente para superar suas fraquezas e ameaças e se tornar meios de tratamentos mais viáveis.

O tratamento térmico, portanto, se torna o mais proeminente na escolha de qualquer método para a delaminação de módulos fotovoltaicos, se mantendo preferencialmente na primeira colocação, positivamente em todos os quadrantes examinados. O fato de a maioria dos métodos de tratamento térmico já serem comercializados, produzirem poucos elementos tóxicos e necessitarem praticamente de somente equipamentos e energia (raramente necessitando de insumos), são um grande fator para sua força no Brasil.

A partir de uma avaliação mais minuciosa, pode-se destacar quais métodos em específico seriam os mais vantajosos no ambiente Brasileiro. Considera-se, portanto que o cenário de crescimento é o mais favorável uma vez somente possui fatores positivos. O cenário de sobrevivência se caracteriza como o mais negativo e os cenários de desenvolvimento e manutenção teriam pesos semelhantes, por possuírem fatores negativos e positivos.

Portanto, a partir da avaliação dos Quadros 10 e 11, foi possível concluir que os métodos que melhor se caracterizariam no sistema brasileiro são SSTD e Eletrotérmico por terem valores parecidos em quase todos os quadrantes

7. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi possível identificar que alguns métodos de reciclagem de painéis fotovoltaicos têm certas vantagens comparado a outros. Entretanto, como foi possível observar, cada método é muito dependente das condições locais operacionais.

A análise SWOT, apesar de não absoluta, conseguiu permitir obter uma boa noção das metodologias de reciclagem desse tipo de material para a realidade brasileira. A indicação de suas vantagens e desvantagens, assim como suas oportunidades e ameaças, podem ainda instigar soluções para os principais problemas destes métodos.

Considerando a realidade Brasileira, onde não é possível realizar a reciclagem de painéis solares em larga escala, o tratamento térmico seria o mais adequado, sendo mais promissores os métodos SSTD e Eletrotérmico. Isso se deve por terem os melhores quadros apresentados nos métodos discutidos na análise SWOT. Sendo assim, estes tratamentos térmicos podem ser considerados métodos de alta recuperação para reuso de componentes, dependendo somente de matriz energética já estabelecida, gerando menos problemas de operação.

Foi concluído, a partir da análise SWOT que, para a adoção de cada método existem predefinições a serem respeitadas. Apesar de o método SSTD e Eletrotérmico serem considerados mais adequados em um quadro geral Brasileiro, a escolha de um método depende de fatores como: localidade, verba, quantidade de módulos a ser reciclada, qualidade da operação etc. Isso se deve por cada método possuir suas vantagens específicas em relação aos demais, não existindo um método superior em todos os aspectos.

Devido as leis e normas estabelecidas no Brasil, junto ao impacto ambiental de descarte inadequado de REEE, é conclusivo a severidade da definição de uma rota padrão para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Dado o tempo de vida de um painel fotovoltaico, um grande fluxo de painéis para descarte já ocorre este ano na Europa. Uma vez que o Brasil começou a ter seu crescimento da energia fotovoltaica por volta de 2013, espera-se que, em 14 anos exista uma quantidade exuberante de resíduos com necessidade de descarte adequado, sem contar módulos que acabam danificados antes do fim de vida útil.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o que foi desenvolvido nesse trabalho, fica como sugestão de trabalhos futuro:

Realização da análise SWOT da segunda etapa de reciclagem dos painéis fotovoltaicos. Apesar de a etapa delaminação ser considerada a crítica do processo, a etapa de separação de materiais é importante por garantir a recuperação de metais e componentes tóxicos das células de primeira e segunda geração.

Análise econômica das rotas observadas para realidade brasileira.

8. REFERENCIAS

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Infográfico ABSOLAR. 2019. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 11 março. 2024.

Acordo setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso domésticos e seus componentes, de 31 de outubro de 2019. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/antigo/images/reminare/documentos/acordo-setorial.pdf>>

AGHAEI, M. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, n. 112160, p. 112160, 2022.

AKIMOTO, Y.; IIZUKA, A.; SHIBATA, E. High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels. **Minerals engineering**, v. 125, p. 1–9, 2018.

AL-EZZI, A. S.; ANSARI, M. N. M. Photovoltaic solar cells: A review. **Applied system innovation**, v. 5, n. 4, p. 67, 2022.

BAGNALL, D. M.; BORELAND, M. Photovoltaic technologies. **Energy policy**, v. 36, n. 12, p. 4390–4396, 2008.

BJELOPAVLIC, D. et al. Simulation of hetero-junction silicon solar cells. **Contemporary materials**, v. 1, n. 2, p. 186–194, 2010.

CHEN, P.-H. et al. Comprehensive review of crystalline silicon solar panel recycling: From historical context to advanced techniques. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 60, 2023.

CHITRA et al. Structural composition and thermal stability of extracted EVA from silicon solar modules waste. **Solar energy (Phoenix, Ariz.)**, v. 211, p. 74–81, 2020.

CHOWDHURY, M. S. et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy strategy reviews**, v. 27, n. 100431, p. 100431, 2020.

Consulta Pública nº 131 de 26 de setembro de 2022. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/web/guest/servicos/consultas-publicas?p_p_id=consultapublicammeportlet_WAR_consultapublicammeportlet&p_p_1>

ifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_consultapublicammeporlet_WAR_consultapublicammeporlet_view=detalharConsulta&resourcePrimKey=2655047&detalharConsulta=true&entryId=2655049>

DE OLIVEIRA NETO, J. F. et al. Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A Review. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 41, n. 4, p. 760–780, 2023.

Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm>

Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11413.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.413%2C%20DE%2013%20DE%20FEVEREIRO%20DE%202023&text=Institui%20o%20Certificado%20de%20Cr%C3%A9dito,de%20que%20trata%20o%20art.>

DIAS, P. R.; BENEVIT, M. G.; VEIT, H. M. Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 34, n. 3, p. 235–245, 2016.

Directiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de junho de 2011. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj/por>>

DIVYA, A. et al. Review on recycling of solar modules/panels. **Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion**, v. 253, n. 112151, p. 112151, 2023.

DOI, T. et al. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. **Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion**, v. 67, n. 1–4, p. 397–403, 2001.

DONI, A.; DUGHIERO, F. Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. **Anais...IEEE**, 2012.

End-of-life management Solar Photovoltaic Panels. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>>. Acesso em: 26 may. 2024.

FARRELL, C. et al. Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2019.

GHAHREMANI, A. et al. Delamination techniques of waste solar panels: A review. **Clean technologies**, v. 6, n. 1, p. 280–298, 2024.

GHALEB AL-AQQAD, A. O.; MENYHART, J. Solar panels problem after end-of-life and waste management (SWOT analysis for the global directives of PV's waste management). **International review of applied sciences and engineering**, v. 14, n. 2, p. 220–229, 2023.

HARTLEY, J. Y. et al. Effects of photovoltaic module materials and design on module deformation under load. **IEEE journal of photovoltaics**, v. 10, n. 3, p. 838–843, 2020.

KALOGIROU, Soteris. **Engenharia de Energia Solar - Processos e Sistemas**. 1. Ed. [s.l.] GEN LTC, 2016.

KIM, J. et al. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy. **Energies**, v. 14, n. 14, p. 4278, 2021.

KIM, Y.; LEE, J. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. **Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion**, v. 98, p. 317–322, 2012.

KO, J. et al. Review on separation processes of end-of-life silicon photovoltaic modules. **Energies**, v. 16, n. 11, p. 4327, 2023.

LADEIRA, Pamela Silva Soares. **Avaliação das principais tecnologias de tratamento de resíduos contaminados com óleo em atendimento à economia circular**. 2024. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>

LI, X. et al. Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 137, p. 312–318, 2022.

LOVATO, É. S. et al. Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. **Journal of CO₂ utilization**, v. 46, n. 101477, p. 101477, 2021.

MAANI, T. et al. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. **The Science of the total environment**, v. 735, n. 138827, p. 138827, 2020.

MARQUES LAMEIRINHAS, R. A.; TORRES, J. P. N.; DE MELO CUNHA, J. P. A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. **Energies**, v. 15, n. 5, p. 1823, 2022.

MILES, R. W.; HYNES, K. M.; FORBES, I. Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. **Progress in crystal growth and characterization of materials**, v. 51, n. 1–3, p. 1–42, 2005.

MILES, R. W.; ZOPPI, G.; FORBES, I. Inorganic photovoltaic cells. **Materials today (Kidlington, England)**, v. 10, n. 11, p. 20–27, 2007.

NAROOIE, M.R. & Biglari, Hamed & Amiri, Rahebeh & Ebrahimzadeh, Gholamreza & Mobini, Mohammad & Yari, Ahmad & Mehrizi, Ehsan & Ahamadabadi, M. & Baneshi, mohammad mehdi. Determining appropriate strategy to improve performance of solid waste recycling system in Zahedan by SWOT method. **Pollution Research**. V. 36, n. 3, p. 437-444, 2017

NASSA, T. **O astro-rei da energia**. São Paulo: ABSOLAR, 2023.

NDIAYE, A. et al. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar energy (Phoenix, Ariz.)**, v. 96, p. 140–151, 2013.

ORESKE, G.; WALLNER, G. M. Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions. **Solar energy (Phoenix, Ariz.)**, v. 83, n. 7, p. 1040–1047, 2009.

PALETTA, F. C.; GOLDEMBERG, J. **Energias renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012.

PASTUSZAK, J.; WĘGIEREK, P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. **Materials**, v. 15, n. 16, p. 5542, 2022.

Portaria Normativa nº 50/GM/MME, de 27 de setembro de 2022. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-normativa-n-50/gm/mme-de-27-de-setembro-de-2022-432279937>>

PREET, S.; SMITH, S. T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook. **Journal of cleaner production**, v. 448, n. 141661, p. 141661, 2024.

R. Frischknecht, K. Komoto, T. Doi 2023, Life Cycle Assessment of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Delamination With Hot Knife Technology, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-25:2023. ISBN 978-3-907281-41-3.

RATHORE, N. et al. A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. **International journal of ambient energy**, v. 42, n. 10, p. 1200–1217, 2019.

Rohan V Angadi, Revanasiddesh B, Vineeth Kumar P K, 2019, A Review on Different Types of Materials Employed in Solar Photovoltaic Panel., **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) RTESIT – 2019 (VOLUME 7 – ISSUE 08)**,

SARSBY, A. **Swot analysis: A guide to swot for business studies students**. [s.l.] Spectaris, 2016.

TAO, J.; YU, S. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. **Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion**, v. 141, p. 108–124, 2015.

XU, X. et al. Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. **Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)**, v. 418, n. 129457, p. 129457, 2021.

XU, Y. et al. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 75, p. 450–458, 2018.

YAN, Y. et al. Recovery of silicon via using KOH-ethanol solution by separating different layers of end-of-life PV modules. **JOM (Warrendale, Pa.: 1989)**, v. 72, n. 7, p. 2624–2632, 2020.
