



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA  
DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS



FRANCISNARA TONHOLI

**CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: RECUPERAÇÃO DO  
VIDRO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE**

PATO BRANCO  
2021

FRANCISNARA TONHOLI

## **CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: RECUPERAÇÃO DO VIDRO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE**

Life Cycle of Photovoltaic Panels: Glass Recovery as an Alternative to Disposal

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná para obtenção do título de “Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos”

Professor Orientador: Dr. Marcos Paulo Belançon

Professor Coorientador: Dr. Marcelo Sandrini

PATO BRANCO  
2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Atribuição – Uso Não Comercial (CC BY-NC) - Permite que outros remixem, adaptem e criem obras derivadas sobre a obra licenciada, sendo vedado o uso com fins comerciais. As novas obras devem conter menção ao autor nos créditos e também não podem ser usadas com fins comerciais. Porém as obras derivadas não precisam ser licenciadas sob os mesmos termos desta licença.

*“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”*

Theodore Roosevelt



FRANCISNARA TONHOLI

**CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: RECUPERAÇÃO DO VIDRO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Tecnologia De Processos Químicos E Bioquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologia De Processos Químicos E Bioquímicos.

Data de aprovação: 27 de Agosto de 2021

Prof Marcos Paulo Belancon, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcelo Sandrini, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcio Barreto Rodrigues, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Vitor Santaella Zanutto, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/10/2021.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda, colaboração e incentivo de muitas pessoas às quais agradeço o apoio dado:

Ao meu orientador Dr. Marcos Paulo Belançon, pelos ensinamentos, paciência e encaminhamentos.

Ao meu coorientador Dr. Marcelo Sandrini, pelas contribuições para a realização deste trabalho, e pelas palavras de incentivo.

À minha mãe Lorizete Tonholi, e toda à minha família, pelo amor, apoio e incentivo proporcionados. Também sou grata à minha avó Ana Antunes Tonholi de Lima (*in memoriam*), que me ensinou valores importantes que contribuíram para a minha educação.

Ao meu noivo Artur Nunes Tavares, por estar ao meu lado ao longo dessa jornada, por todo amor, incentivo e apoio a mim dedicado. E, em especial aos meus sogros, que sempre me apoiaram e incentivaram a ir atrás de meus objetivos.

Agradeço a todos os *professores* da UTFPR, por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de *formação profissional*. Meus eternos agradecimentos.

Meus agradecimentos às minhas amigas Leticia e Jilvana, que compartilhamos da amizade desde a graduação, e aceitaram caminhar nessa jornada difícil que é o mestrado juntas. Aos amigos que eu fiz ao longo do mestrado em especial Giulia e Henrique gratidão por todos os momentos passados juntos.

Ao professor Dr. Gustavo Sanguino Dias pelas análises realizadas na Central de Microscopia (CMI) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

À Central de Análises da UTFPR Campus Pato Branco, pela realização das análises que foram de extrema importância para a realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

TONHOLI, Franciscara. CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: RECUPERAÇÃO DO VIDRO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

No intuito de reciclar módulos fotovoltaicos, cedido pela Universidade Tecnológica do Paraná – Campus Pato Branco/PR, pesquisadores têm investigado formas de mitigar essa problemática. Com a expansão do uso dos painéis fotovoltaicos, para a geração energética, estudos preveem um acúmulo de até 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis fotovoltaicos em 2050. Dessa forma, neste trabalho foram estudadas as composições do módulo e a reciclagem da cobertura de vidro do painel, pois o vidro de um painel solar de silício é responsável por cerca de 2/3 do peso do dispositivo. Os métodos de reciclagem geralmente exigem que o painel seja quebrado, o que mantém a tampa de vidro em fragmentos de baixo valor. Aqui, demonstramos que o vidro pode ser recuperado sem quebrar por meio de um processo técnico. Devido à sua resistência química e mecânica, este vidro estaria pronto para ser reaproveitado sem a necessidade de fundi-lo novamente, trazendo com isso importante economia de energia, e emissão de carbono relacionados à sua produção. O material estaria pronto para ser utilizado em outro painel solar ou, ainda, como material de arquitetura ou outra aplicação. Além disso, utilizamos Espectroscopias de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR), Raman, Análise Térmica, Difratomia de Raios X (DRX), Espectroscopia de Absorção Óptica (UV-Vis), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) para confirmar a composição dos componentes remanescentes, bem como para identificar o envelhecimento. Confirmamos que nosso painel de estudo-caso tem uma composição semelhante à maioria dos painéis solares de silício do mercado, e os resultados indicaram que seria viável recuperar o vidro na maioria desses dispositivos e, assim, reduzir as emissões de carbono do sistema fotovoltaico industrial em mais de 2 milhões de toneladas a cada ano.

Palavras-chave: painel fotovoltaico, reciclagem, reutilização, vidros

## ABSTRACT

TONHOLI, Franciscara. LIFE CYCLE OF PHOTOVOLTAIC PANELS: GLASS RECOVERY AS AN ALTERNATIVE TO DISPOSAL. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

In order to recycle photovoltaic modules, provided by the Federal University of Technological Paraná – Campus Pato Branco/PR, researchers have investigated ways to mitigate this problem. With the expansion of the use of photovoltaic panels for energy generation, studies predict an accumulation of up to 78 million tons of waste from photovoltaic panels in 2050. Thus, in this work the module compositions and the recycling of the panel's glass cover were studied, since the glass of a silicon solar panel accounts for about 2/3 of the device's weight. The recycling methods often require to broke the panel, which maintain the glass cover in low-value fragments. Here, we demonstrate that the glass can be recovered through a technical process, without being broken. Due to its chemical and mechanical resistance, this glass would be ready to be reused without the need to be melted again, bringing with it important energy savings and carbon emissions related to its production. The material would be ready to be used in another solar panel, as an architectural material or other application. In addition, we used Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR), Raman, Thermal Analysis, X-Ray Diffractometry (XRD), Optical Absorption Spectroscopy (UV-Vis), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) to confirm the composition of the remaining components as well as to identify aging. We confirmed that our case study panel has a composition similar to most silicon solar panels on the market, and the results indicated that it would be feasible to recover the glass in most of these devices, thus, reducing carbon emissions from the industrial photovoltaic system in more than 2 million tons per year.

Keywords: photovoltaic panel, recycling, reuse, glass

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta mundial de energia por fonte em 2018.....	16
Figura 2 – Nível de acessibilidade à energia elétrica durante o ano de 2014. ....	17
Figura 3 – Global horizontal irradiation (GHI) no mundo em kWh/m <sup>2</sup> médios por dia	20
Figura 4 – Média anual brasileira de irradiação solar em Wh/m <sup>2</sup> /dia.....	21
Figura 5 – Evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica nos principais países (GW) de 2010 à 2019 .....	22
Figura 6 – Estrutura básica dos painéis fotovoltaicos .....	23
Figura 7– Estrutura do EVA.....	26
Figura 8 – Mecanismo de a) reação de Norris I e b) reação de Norris II .....	26
Figura 9 – Mecanismo de reação de Norris III .....	27
Figura 10 – Amarelamento de módulos fotovoltaicos.....	27
Figura 11 – Principais fatores responsáveis por degradações em módulos fotovoltaicos .....	31
Figura 12 – Projeção cumulativa da capacidade fotovoltaica global .....	32
Figura 13 – Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos	32
Figura 14 – Estágios do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos.....	37
Figura 15 – Painéis fotovoltaicos acumulados mundialmente até 2050 .....	38
Figura 16 – Opções para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (3Rs).....	39
Figura 17 – a) Especificações do módulo fotovoltaico, b) Módulo fotovoltaico .....	42
Figura 18 – Fotografias do módulo fotovoltaico em processo de desintegração física .....	43
Figura 19 – Fotografias das amostras em delaminação por solvente .....	44
Figura 20 – Fluxograma das atividades realizadas .....	45
Figura 21 – Vidro recuperado por processo mecânico.....	49
Figura 22 – Amostra obtida após 48 horas por delaminação por solvente com o reagente Tetrahidrofurano.....	50
Figura 23 – Curva DTG do EVA do módulo fotovoltaico .....	51
Figura 24 – Curva DTA do EVA do módulo fotovoltaico.....	52
Figura 25 – Curva DSC do EVA do módulo fotovoltaico .....	52
Figura 26 – Curvas TGA/DTG/DTA do Backsheet do módulo fotovoltaico .....	53
Figura 27 – Difratoograma do silício do painel fotovoltaico após o processo de separação.....	54

Figura 28 – Eletrodo transversal ampliado 300 $\mu\text{m}$ .....	55
Figura 29 – Pó do silício ampliado 100 $\mu\text{m}$ .....	55
Figura 30 – Espectro de EDS da superfície do eletrodo .....	56
Figura 31 – Espectro de EDS transversal do eletrodo .....	57
Figura 32 – Espectro de EDS transversal do eletrodo .....	57
Figura 33 – Espectro de EDS do pó de silício .....	58
Figura 34 – Principais bandas analisadas nos espectros FTIR-ATR para o EVA do módulo fotovoltaico e seus respectivos grupos funcionais .....	59
Figura 35 – Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico .....	61
Figura 36 – a) Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico com os solventes sem agitação; b) Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico com os solventes com agitação .....	62
Figura 37 – Espectros Raman típicos de módulo de Silício não envelhecido com encapsulamento EVA .....	62
Figura 38 – Diferença no EVA do módulo e EVA após imersão com o solvente Ácido acético .....	63
Figura 39 – Sinal Raman da região de alongamento CH, mostrando a deconvolução da banda com cinco sinais Lorentzianos .....	64
Figura 40 – UV-Vis do vidro retirado do módulo fotovoltaico .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros esperados do material encapsulante em células fotovoltaicas .....	25
Tabela 2 – Relação temperatura, efeito causado e consequência em um encapsulante .....	28
Tabela 3 – Especificações do módulo fotovoltaico .....	42
Tabela 4 – Peso do módulo fotovoltaico .....	43
Tabela 5 – Status das amostras imersas nos solventes .....	49
Tabela 6 – Bandas analisadas nos espectros de FTIR-ATR para as amostras do encapsulante EVA em vários reagentes .....	59
Tabela 7 – Bandas analisadas nos espectros de Raman para as amostras do encapsulante EVA.....	60

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Ciclo de vida  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
a-Si – Silício Amorfo  
CdTe – Telureto de cádmio  
CIGS – Seleneto de cobre índio-gálio  
c-Si – Silício cristalino  
CRESESB – Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio Brito  
EPA – *Environmental Protection Agency*  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
EVA – Acetato-vinilo de etileno  
GW – Gigawatts  
IEA – Agência Internacional de Energia  
IEA-PVPS – *International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme*  
IRENA – *International Renewable Energy Agency*  
kg – Quilograma  
kPa – Quilopascal  
kWh/m<sup>2</sup> – Quilo Watt-hora por metro ao quadrado  
kWh/m<sup>2</sup>/dia – Quilo Watt-hora por metro ao quadrado por dia  
LID – *Light Induced Degradation*  
NBR – Norma Técnica  
REN21 – *Renewables Now*  
OPV – Células fotovoltaicas orgânicas  
PIB – Produto Interno Bruto  
PID – *Potential Induced Degradation*  
PV Cycle – Organização sem fins lucrativos de gerenciamento de resíduos  
REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos  
SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*  
TPA – Tedlar-PETPoliamida  
TPT – Tedlar/PET/TedlarTCLP  
TCLP – *Toxicity Characteristics Leaching Procedure*  
UV – Ultravioleta  
W/mK – Watt por metro Kelvin

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 Contexto Energético Mundial .....	16
3.2 Energias Renováveis .....	18
3.3 Irradiação e Radiação Solar .....	19
3.3.1 Energia Solar Fotovoltaica .....	21
3.4 Composição dos Painéis Fotovoltaicos .....	23
3.4.1 Células Fotovoltaicas .....	23
3.4.2 Encapsulante.....	24
3.4.2.1 Fotodegradação .....	25
3.4.2.2 Hot-spots .....	28
3.4.3 Contatos metálicos .....	28
3.4.5 Backsheet.....	29
3.4.6 Caixa de Junção.....	30
3.4.7 Moldura de Alumínio.....	30
3.5 Fim de Vida e os Impactos Ambientais dos Painéis Fotovoltaicos.....	30
3.6 Legislação .....	34
3.7 Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos .....	37
<b>4. MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO</b> .....	<b>46</b>
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV) .....	46
4.2.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia – (EDS).....	46
4.2.3 Difractometria de raios X – (DRX).....	46
4.2.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier – (FTIR- <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> ).....	46
4.2.5 Análise Térmica.....	47
4.2.6 Espectroscopia de Absorção Óptica – (UV-Vis) .....	47
<b>5.RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>

<b>5.1 Separação do vidro temperado e da célula fotovoltaica usando solventes orgânicos .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL .....</b>	<b>50</b>
5.2.1 Análise Térmica.....	50
5.2.2 Difractometria de raios X – (DRX).....	53
5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura com detectores de energia dispersiva de raios X (MEV-EDS) .....	54
<b>5.3 ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA .....</b>	<b>58</b>
5.3.1 Espectroscopia de transmissão na região do infravermelho com transformada em Fourier – (FTIR-ATR) .....	58
5.3.2 Espectroscopia de Micro-Raman .....	60
5.3.3 Espectroscopia de Absorção Molecular – (UV-Vis).....	64
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A alta demanda energética mundial vem acompanhada de um crescimento populacional. Ela traz consigo a preocupação em suprir as necessidades econômicas e industriais, além de contribuir com a melhoria dos padrões de vida de países desenvolvidos. Mesmo considerando a produção de energia já obtida através de fontes renováveis, é grande ainda a necessidade da introdução de recursos complementares na matriz energética mundial, tendo em vista a perspectiva de esgotamento de fontes não renováveis baseadas majoritariamente em derivados de petróleo. Além disso, é a partir de combustíveis fósseis que a geração impacta negativamente o meio ambiente, fator que cada vez mais vem ganhando papel de destaque nas políticas de desenvolvimento sustentável.

Considerando que o sol é a fonte primária mais abundante no planeta, o aproveitamento da irradiação solar para a produção de energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico tem sido assunto para debate. Isso se deve em razão desta ser tida como uma alternativa para esses fins, a levar em conta a redução das emissões de gases de efeito estufa e, em muitos casos, de outros impactos ligados à construção de empreendimentos energéticos. Visto que o modo de produção de energia caracteriza um elemento significativo de degradação ambiental e, ao mesmo tempo, está na base da evolução da tecnologia humana, de modo a despertar o interesse de investidores nessa área (PINHO; GALDINO; 2014; KLEPA *et al.*, 2016).

A irradiação média anual brasileira varia entre 1200 a 2400 kWh/m<sup>2</sup> por ano. No entanto, estes sistemas têm se tornado competitivos apenas nos últimos anos, de maneira que o imenso potencial dessa energia ainda é pouco explorado (PEREIRA, *et al.*, 2006). Todavia, à medida que a procura pela tecnologia fotovoltaica veio a se intensificar, ocorreu também um aumento da produção de módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, de resíduos gerados pelo fim de vida útil dos mesmos, a variar entre 25 a 30 anos, em média (IRENA; IEA-PVPS, 2016). Por esse motivo, espera-se um acúmulo significativo desses resíduos a partir de 2030.

O avanço da tecnologia fotovoltaica, bem como a inserção deste novo tipo de resíduo na sociedade, representa um novo desafio para a sustentabilidade do setor energético em termos ambientais, com possíveis conseqüências para a saúde

humana, animal e vegetal, caso um sistema de tratamento adequado não venha a ser implementado.

Nesse contexto, a reciclagem dos módulos fotovoltaicos surge como uma alternativa a fim de minimizar o problema do acúmulo dos resíduos gerados. Porém, a diversidade de materiais presentes nos dispositivos torna o processamento destes um grande desafio tecnológico.

Dessa forma, considerando o aumento exponencial do uso de painéis fotovoltaicos e atendendo ao problema futuro dos resíduos, o presente trabalho objetiva contribuir com os estudos no processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos.

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivo geral

Investigar os impactos e ciclo de vida das placas fotovoltaicas no meio ambiente e desenvolver mecanismos para mitigá-los.

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os elementos presentes no módulo fotovoltaico cedido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco/PR;
- Avaliar a viabilidade técnica de reciclagem dos diversos componentes/materiais caracterizados, em especial o vidro.

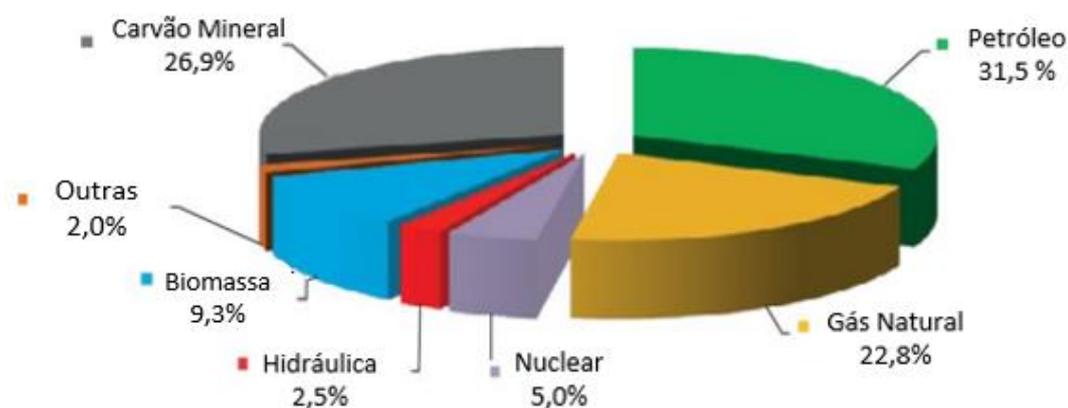
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Contexto Energético Mundial

De acordo com Goldemberg e Lucon (2007), até alguns séculos atrás a necessidade energética do homem, a qual se baseava em aquecer e preparar alimentos, era suprida pela lenha. Contudo, com o passar do tempo e o consequente aumento do consumo de energia, outras fontes se tornaram essenciais.

Conforme estudos desenvolvidos por Pereira *et al.* (2006), o aumento intensivo do consumo de energia – cujo início foi marcado pela Revolução Industrial no século XX – indica uma tendência de crescimento da demanda energética. Isso se justifica à medida que surgiram novas máquinas destinadas a aumentar a produtividade das indústrias, trabalhando intensivamente, ao mesmo tempo em que novos meios de transporte fomentaram o desenvolvimento socioeconômico da população. Essa tendência pode ser observada até os dias atuais.

A Figura 1 apresenta a composição da oferta de energia mundial no ano de 2018.



**Figura 1 – Oferta mundial de energia por fonte em 2018.**

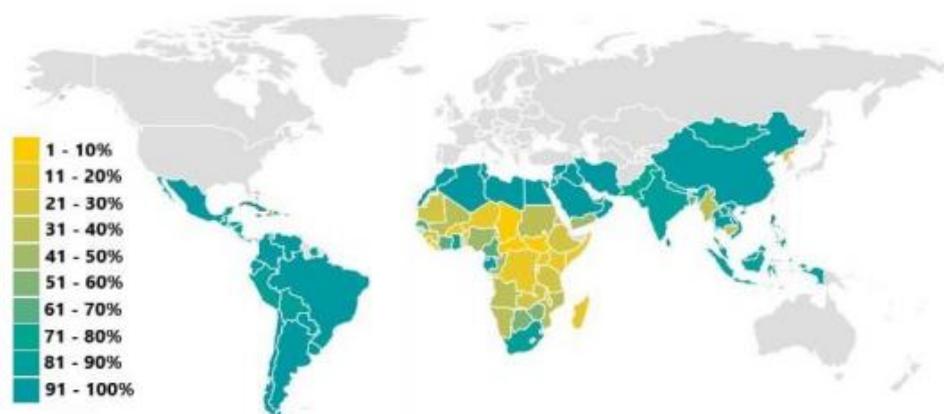
Fonte: Adaptado de IEA (2020)

A partir da Figura 1, é possível observar que as fontes renováveis representam apenas 1/3 da energia oriunda do petróleo e cerca de 1/8 da energia proveniente de todos os combustíveis fósseis (IEA, 2020).

Diante disso, a definição de alguns conceitos se faz imprescindíveis. Conceitos como o de intensidade energética – que se define como a razão entre o fornecimento de energia primária – e o PIB, são utilizados como indicadores com a finalidade de

acompanhar o progresso da eficiência energética mundial. A energia primária, por sua vez, é definida tal qual a forma direta como se apresenta pela natureza, a exemplo tem-se: a hidráulica, o petróleo, gás natural, carvão mineral, minério de urânio, resíduos (vegetais e animais), lenha, energia eólica e energia solar (EPE, 2016). Todavia, as fontes primárias, em sua grande maioria, são transformadas em outra forma de energia para então poder ser utilizada.

Apesar das diversas fontes de geração de energia (renováveis ou não), tratando-se de acessibilidade à eletricidade, existem grandes diferenças entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. De acordo com o relatório REN21 (2017), diversas regiões da África sofriam com precariedade na geração de energia elétrica, acarretando num baixo consumo por falta de acesso. Apenas 3% do consumo global de eletricidade se concentrava no continente africano, conforme mostra a Figura 2.



**Figura 2 – Nível de acessibilidade à energia elétrica durante o ano de 2014.**

Fonte: REN21 (2017).

Em contrapartida, países pertencentes a América do Sul e América Central apresentavam alto nível de acessibilidade à energia elétrica no mesmo período – entre 91% a 100% (REN21, 2017), o que fez com que a eficiência energética fosse extremamente importante para toda estratégia desenvolvida a fim de garantir crescimento econômico sustentável e inclusivo.

Vale frisar que o planejamento e a preocupação com o futuro permanecem sendo uma das maneiras para se aumentar a segurança do suprimento de energia, expandir a competitividade e o bem-estar e reduzir a pegada ambiental do sistema energético. O que se sabe, de fato, é que o crescimento das emissões de carbono pode ser amenizado pelo uso mais eficiente da energia, mas a eficiência energética

também pode reduzir a poluição local e contribuir para redução de milhões de mortes prematuras relacionadas à poluição do ar a cada ano (IEA, 2018).

Nesse contexto, países em constante desenvolvimento tecnológico como o Brasil, Índia, China e Rússia dividiram a responsabilidade quanto ao aumento da demanda energética, que visava sustentar esse mercado (FIORIN *et al.*, 2011). Porém, segundo Goldemberg e Lucon (2007), a produção e o consumo de energia ainda continuam seguindo padrões baseados em fontes não renováveis, a colocar em risco o suprimento global das próximas gerações. Neste ponto, há destaque para o Brasil, uma vez que o país não possui grandes reservas de combustíveis fósseis de boa qualidade, avaliando-se que a quantidade disponível será suficiente para suprir a necessidade nacional somente até o ano de 2035.

Além destes, países como Canadá, Finlândia, França e Holanda assumiram o compromisso de diminuir ou eliminar totalmente a geração de energia a partir do carvão, pois as evidências dos danos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis durante séculos são incontestáveis. Dentre elas, há o destaque para a intensificação do aquecimento global associado à queima destes combustíveis (REN21, 2017; VICHI; MANSOR, 2009).

Por conta da limitação e dos impactos decorrentes de materiais não renováveis, o uso de fontes de energia renováveis para gerar eletricidade deverá aumentar consideravelmente em breve. Isso se deve, em grande parte, à queda de custos e políticas governamentais favoráveis (IEA, 2020). Essa projeção decorre de políticas governamentais, incluindo subsídios, e deverá corresponder a 44% do crescimento total na geração de eletricidade sobre o período de 2009 a 2035.

### 3.2 Energias Renováveis

Energias renováveis são provenientes de recursos naturais. Estas podem regenerar-se espontaneamente, ou seja, são consideradas inesgotáveis. Atualmente funcionam como alternativas aos combustíveis fósseis, pois apresentam um menor impacto ambiental ao nosso planeta (NASCIMENTO; ALVES, 2017).

No estudo de Aleixandre-Tudó (2019), o autor cita que o uso de energia renovável possui vários aspectos positivos, os quais implicam significativamente para redução da emissão de gases de efeito estufa e, portanto, influenciam de forma favorável as mudanças climáticas. A mitigação das mudanças climáticas e a

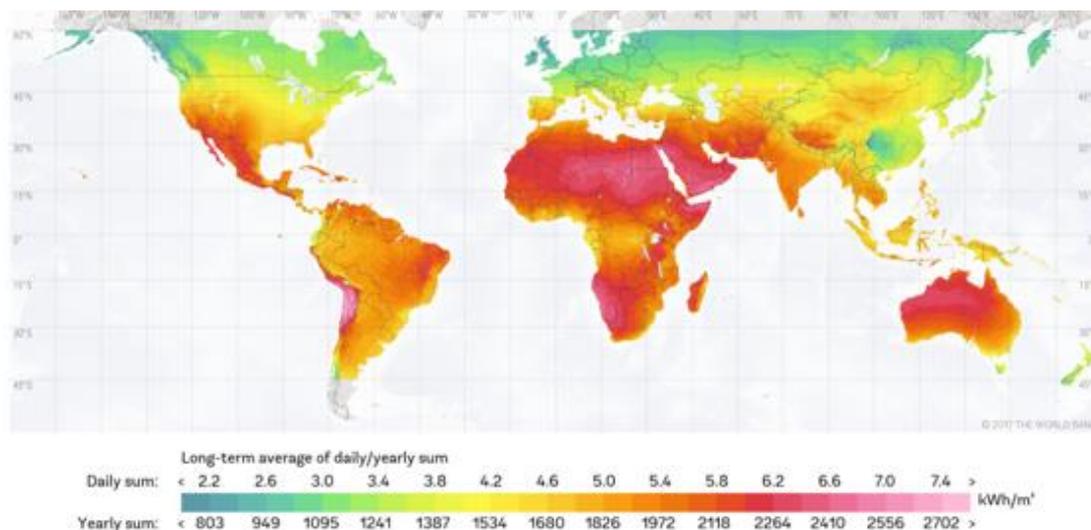
necessidade de atender rapidamente às crescentes demandas de energia foram propostas pelos governos e organizações como os mais importantes desafios mundiais, podendo ser alcançados a partir do avanço de energias renováveis. Isso se deve à sua natureza ambientalmente amigável e sustentável (REN21, 2016).

De maneira geral, o desenvolvimento sustentável de energia renovável depende de várias condições, incluindo fatores econômicos, como os custos de desenvolvimento e a utilização; e fatores tecnológicos, como aceitação social e restrições ambientais. Por outro lado, o avanço das energias renováveis é de importância crucial para o desenvolvimento da sociedade (ALEIXANDRE-TUDÓ, 2019, “tradução nossa”).

### 3.3 Irradiação e Radiação Solar

Radiação solar é a energia emitida pelo sol na forma de radiação eletromagnética. A disponibilidade de radiação solar na superfície do planeta depende de diversos fatores que influenciam a viabilidade e a eficiência do sistema de um painel fotovoltaico como latitude do local e época do ano, além de condições climáticas (nebulosidade, umidade relativa do ar) (GOMEZ *et al.*, 2018; TOLMASQUIM, 2016).

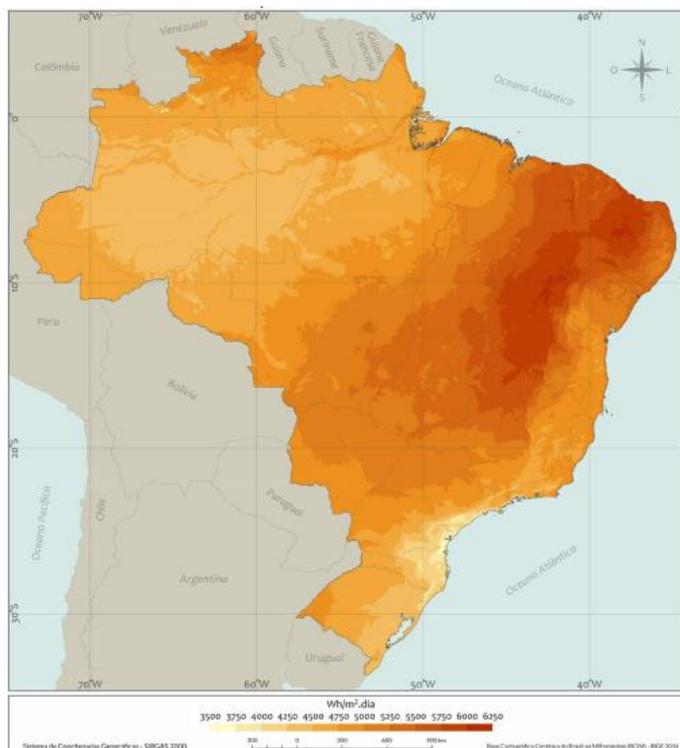
A variabilidade da irradiância solar em algumas regiões do espectro tem chamado atenção devido a sua importância para a química e para a dinâmica da atmosfera terrestre. A irradiância solar total pode variar de 0,1% entre o máximo/mínimo solar. Entretanto, as emissões no ultravioleta (UV) variam de 3 a 4% entre 200 a 300 nm (GOMEZ *et al.*, 2018). A irradiância horizontal global mede a densidade de recursos solares disponíveis por área de superfície, dada em kWh/m<sup>2</sup> médios por dia, conforme mostra a Figura 3.



**Figura 3 – Global horizontal irradiation (GHI) no mundo em kWh/m<sup>2</sup> médios por dia**  
 Fonte: Solar Energy: Mapping the Road Ahead (IEA, 2019)

Alguns dos grandes consumidores de energia do planeta desfrutam de um GHI favorável; contudo, o investimento em energia solar é crescente mesmo em regiões que possuem um GHI relativamente baixo. A Europa e a Rússia possuem bons níveis de radiação solar, mas estes níveis são ainda melhores em lugares como a África, Oriente Médio, Austrália, Índia, China e outros países asiáticos; isto é, regiões em que a demanda por energia deve aumentar nas próximas décadas (IEA, 2019).

Conforme a base de dados internacional *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), o Brasil possui uma radiação global pertencente à faixa de 4,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup> por dia. Este é um valor acima da média mundial, o que faz com que o país ocupe a quinta colocação dos países com melhor potencial solar. A Figura 4 mostra a Irradiação Global Horizontal Anual do Brasil publicada no Atlas Brasileiro de Energia Solar do INPE, em 2017.



**Figura 4 – Média anual brasileira de irradiação solar em Wh/m<sup>2</sup>/dia.**  
 Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

### 3.3.1 Energia Solar Fotovoltaica

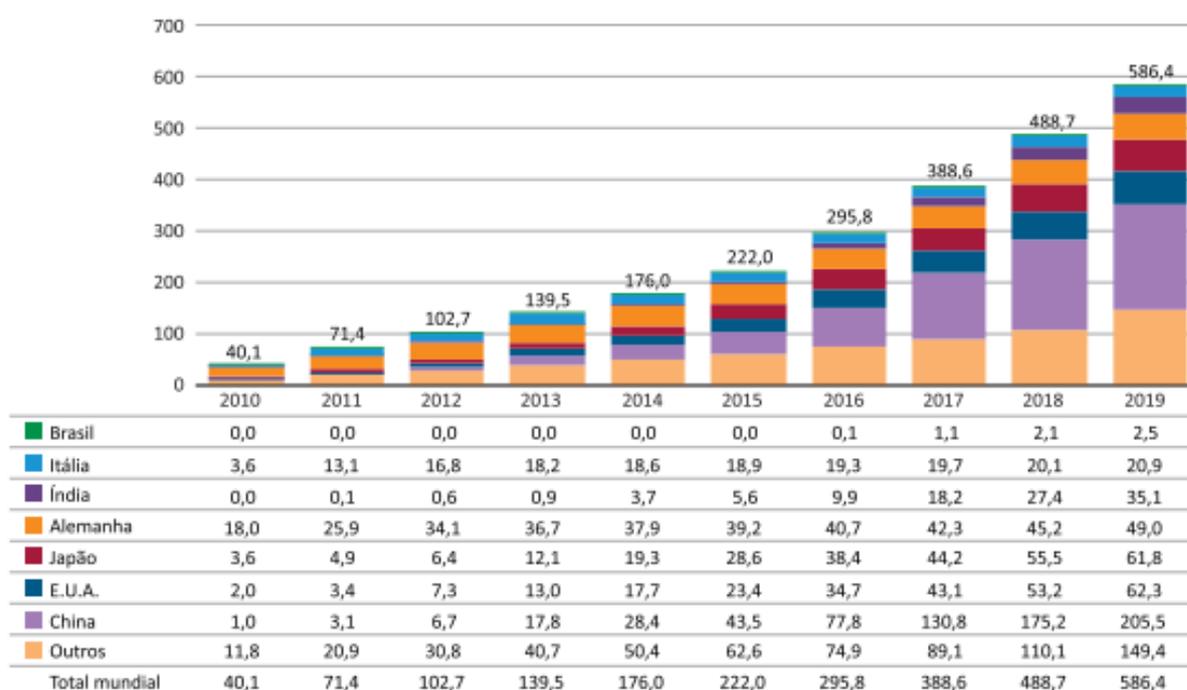
A energia solar é aproveitada diretamente do sol, mesmo quando o tempo está nublado. Ela é usada em todo o mundo e conseqüentemente vem tornando-se cada vez mais popular entre os países que objetivam gerar energia (IRENA, 2021).

Com a invenção da primeira célula solar fotovoltaica em 1954, na Bell Telephone Laboratories nos Estados Unidos, com a capacidade de converter energia solar em elétrica – embora a eficiência da célula fosse de 6%. Essa descoberta foi considerada revolucionária por ter mostrado ao mundo a possibilidade de utilizar uma fonte de energia inesgotável. A partir disso, a produção em nível industrial da tecnologia fotovoltaica foi iniciada em 1956 (IRENA, 2021; OLIVEIRA, 2017; MACHADO; MIRANDA, 2015).

Mediante à crise do petróleo em 1970, o mercado da energia solar foi interrompido. Porém, a partir dos anos 2000, voltou a se recuperar e vivenciou um rápido desenvolvimento da tecnologia, que em 2015 teve uma produção mundial de células fotovoltaicas de 222 GW, seguida de um aumento em 2016 de 295,8 GW. Estes resultados apontam o rápido crescimento e a acelerada produção dos componentes fotovoltaicos (TIMILSINA *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2017).

Com incentivo, a geração de energia solar fotovoltaica tem se expandido mundialmente. Este crescimento exponencial deve-se, em grande parte, às preocupações em relação aos impactos ambientais causados pelo efeito estufa.

Em 2019 a participação da energia solar fotovoltaica na geração global de energia, foi correspondente a 2,68%. A energia solar tem crescido exponencialmente, apesar de tímida. De fato, no final do ano 2019 a capacidade solar instalada global atingiu 586,4 GW, um acréscimo de 20% ao ano anterior e cerca de 15 vezes maior do que o observado em 2010. Conforme mostra a Figura 5 abaixo, a geração de energia entre os anos 2010 e 2019, cresceu, em média, 30,8% ao ano no mundo. O Brasil não está em uma posição muito relevante, no qual, os dados de 2019 representam apenas 0,4% da capacidade mundial instalada, em geração fotovoltaica (BEZERRA, 2021).



**Figura 5 – Evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica nos principais países (GW) de 2010 à 2019**

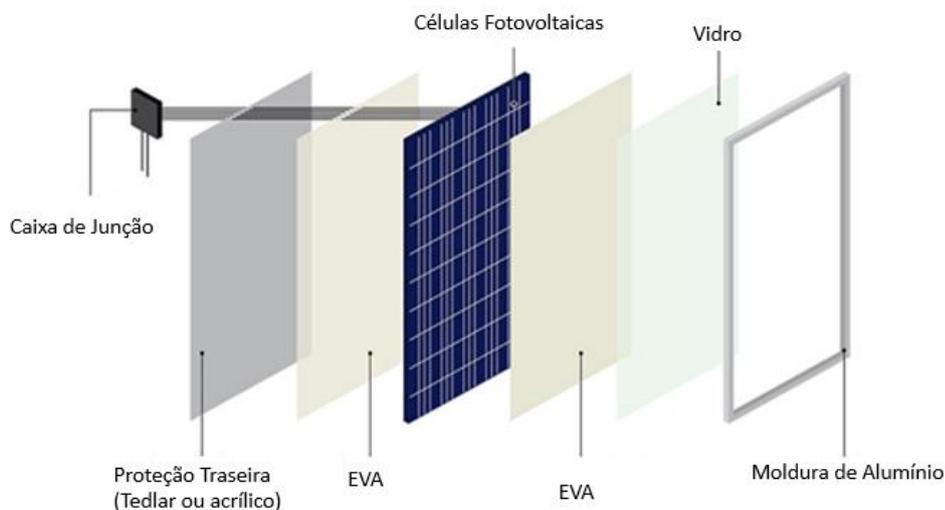
Fonte: BEZERRA (2021)

### 3.4 Composição dos Painéis Fotovoltaicos

Os componentes dos painéis fotovoltaicos empregados no mercado fotovoltaico são a chave para definir os resíduos dos módulos em fim de vida, bem como os métodos de tratamento e eliminação dos resíduos gerados.

Os painéis silício cristalino (c-Si) são fabricados com silício de alta pureza – usado para fazer *wafers* (bolachas) –, que sofrem um processo de dopagem com boro e fósforo e são transformados em células. Para formar um campo elétrico, as partes frontal e traseira da célula são conectadas a uma pasta de prata e alumínio, impressas em formato de grade (IRENA; IEA, 2016).

As células são interconectadas eletricamente em série, onde são empregadas na base de 60 a 72 células. Em seguida, as células são conectadas, o filme protetor (EVA), o vidro temperado e uma folha traseira protetora (tedlar) são encapsuladas. Todos esses elementos são fixados em uma moldura de alumínio (LUNARDI *et al.*, 2018), conforme apresenta a Figura 6.



**Figura 6 – Estrutura básica dos painéis fotovoltaicos**

Fonte: Tesla Store (2018).

Os painéis fotovoltaicos c-Si tem seu peso composto por 76% de vidro, 10% de polímero, 8% de alumínio, 5% de silício, 1% de cobre e menos de 0,1% de prata e outros metais, principalmente estanho e chumbo (LUNARDI *et al.*, 2018).

#### 3.4.1 Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é um dos principais componentes dos painéis fotovoltaicos, Estas podem ser produzidas em vários tipos: células de silício cristalino (c-Si), células de silício monocristalinas (mono-Si), células de silício multicristalinos (multi-Si), células de silício amorfo (a-Si), células de filme fino (Thin-Film), células de heterojunção (HJT), células de telureto de cádmio (CdTe), células orgânicas (OPV), células de seleneto de cobre índio e gálio (CIGS) e células de arseneto de gálio (GaAs).

As células de silício cristalino são as mais utilizadas no mundo, ocupando mais de 90% no mercado atual devido seu baixo custo de produção e alta eficiência (KANG *et al.*, 2012; IRENA, IEA-PVPS, 2016).

Em combinação de camadas de materiais semicondutores, as células solares são formadas de modo a possibilitar o surgimento de um campo elétrico. Quando expostos à luz, alguns elétrons do material absorvem fótons. Tais fótons, quando acelerados, geram uma corrente através da junção e criam uma diferença de potencial. Os condutores são conectados em ambos os lados das células, permitindo coletar a eletricidade gerada (MACHADO; MIRANDA, 2015).

### 3.4.2 Encapsulante

O filme encapsulante para o painel solar, também denominado de acetato-vinilo de etileno (EVA), encontra-se na superfície da célula fotovoltaica. É um material selante de cura rápida que protege as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por radiação UV, temperaturas extremas e umidade, garantindo que o máximo de luz visível atinja as células solares. Além deste, também podem ser utilizados o polivinil butiral (PVB), poliuretano termoplástico (TPU), poliolefina termoplástica (TPO), dimetil polissiloxano (PDMS), entre outros polímeros (SCHNELLER *et al.*, 2016).

O uso do EVA é difundido nas indústrias de painéis fotovoltaico por causa do seu baixo custo, alta resistência à adesão, alta transparência na região da luz visível e índice de refração com propriedades de transmissão semelhantes ao vidro na faixa de 400 a 1100 nm (HIRSCHL *et al.*, 2013; LYU *et al.*, 2018). Outras características são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros esperados do material encapsulante em células fotovoltaicas**

Temperatura de trabalho	< - 40°C
Transmissão de luz hemisférica total	> 90% da luz incidente
Hidrólise	Nenhuma a 80°C e 100% de UR
Absorção de água	< 0,5 m/m% a 100% de UR
Resistência à absorção térmica	Estável acima de 80°C
Fluidez mecânica	Nenhuma a 50°C
Módulo de cisalhamento	<20,7MPa (3000Psi) a 25°C
Temperatura de fabricação	Menor ou igual a 171°C
Pressão de fabricação por laminação	Menor ou igual a 1atm
Inércia química	Nenhuma reação a 90°C
Degradação por absorção UV	Nenhuma a comprimento de onda > 350nm
Turvamento	Nenhum a 80°C e 100% de UR
Odor, toxicidade	Nenhum

Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

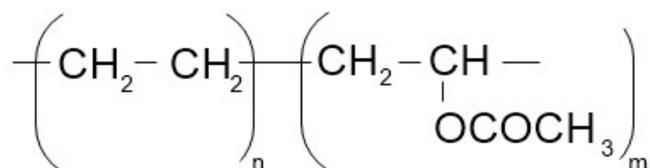
A formulação de polímeros para módulos fotovoltaicos varia entre 28 a 33% em peso de acetato de vinila, que inclui aditivos como agentes de cura, absorvedores de ultravioleta (UV), foto antioxidantes, etc. (BADIEE *et al.*, 2016).

#### 3.4.2.1 Fotodegradação

A fotodegradação é umas das principais falhas que podem ocasionar mecanismos de degradações, como LID (Light Induced Degradations); e posteriormente pode evoluir para PID (Potential induced degradation). Essas degradações são desencadeadas a partir de vários fatores, sendo a maioria por intemperismo ou agentes externos. Retardar a degradação natural de um módulo fotovoltaico é um fator essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias para o ramo. A radiação solar, sobretudo em seus componentes de maior energia – no ultravioleta ou próximo a ele –, possui energia suficiente para gerar a dissociação das ligações covalentes de polímeros, como o EVA, por exemplo.

Mais especificamente, a fotodegradação, degradação oxidativa ou foto-oxidação se inicia na presença de oxigênio e absorção de UV, gerando radicais livres que, por consequência, degradam o polímero. Portanto, são fatores ambientais que aceleram a degradação dos painéis; podendo ser a alta umidade, temperatura de operação no módulo fotovoltaico acima dos 55°C e alta incidência de UV (JIN; CHEN; ZHANG, 2010).

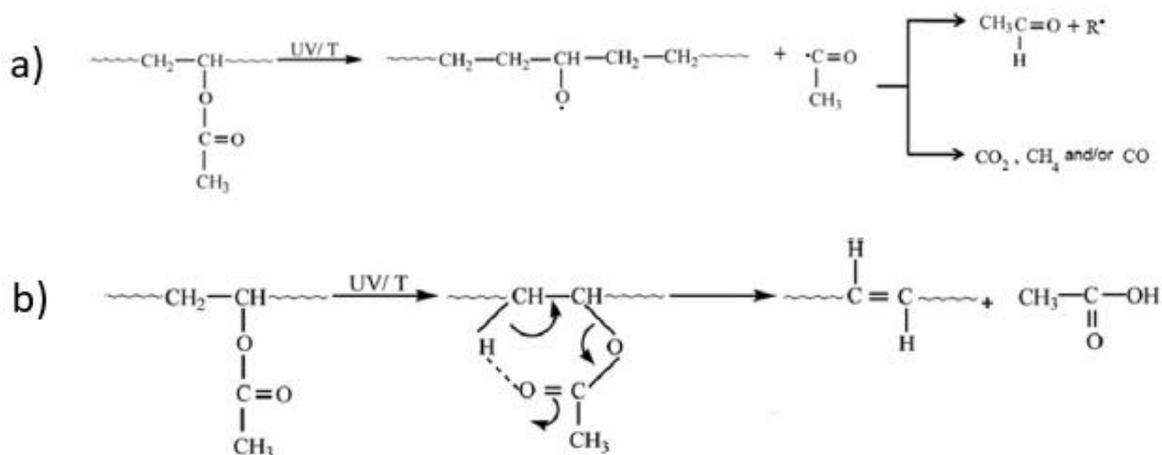
Os copolímeros de EVA são compostos por etilenos e acetatos de vinilas, demonstrado na Figura 7. O mecanismo de degradação ocasiona a formação de polietileno e do poliacetato de vinila.



**Figura 7– Estrutura do EVA**

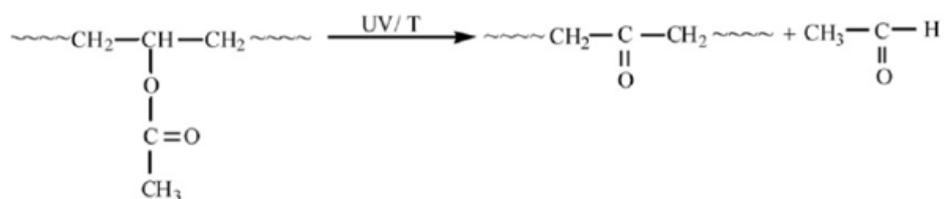
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA *et al.*, (2018)

Na Figura 8 apresenta uma reação entre o hidroperóxido formando composto com grupo cetona. Os principais mecanismos que ocorrem na degradação do EVA são de Norris I e III, sendo que no mecanismo de Norris I ocorre a formação de gases como CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>, e no mecanismo de Norris II ocorre a desacetilação do EVA, enquanto o mecanismo de reação de Norris III (Figura 9), por sua vez, resulta na formação final de acetona e aldeído (MUNOZ *et al.*, 2011).



**Figura 8 – Mecanismo de a) reação de Norris I e b) reação de Norris II**

Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2018a).



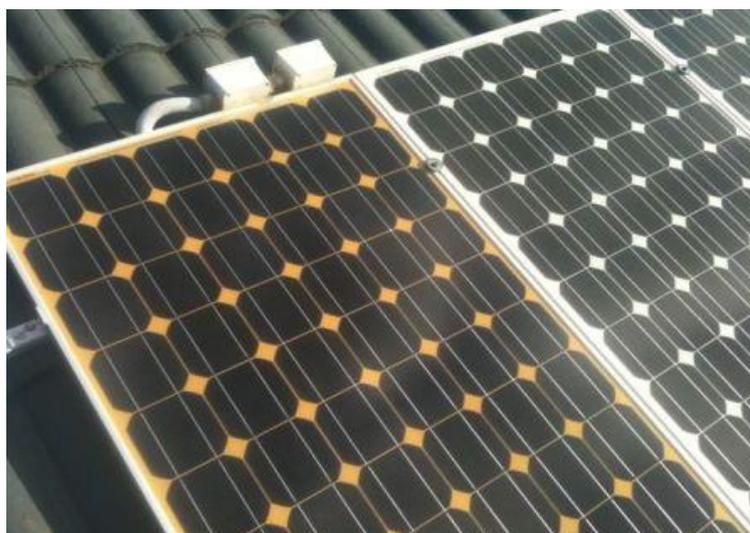
**Figura 9 – Mecanismo de reação de Norris III**

Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2018a).

Os gases formados ocasionam bolhas e delaminações, uma vez que ficam aprisionados entre interfaces. Esta situação corrobora a perda do desempenho; de outro lado, o acetaldeído provoca amarelamento, degradação do encapsulante e corrosão dos contatos metálicos que, por consequência, diminui a eficiência da célula fotovoltaica (SINHA; SASTRY; GUPTA, 2016).

A corrosão provocada pelo acetaldeído gera um aumento de resistência do módulo fotovoltaico. Isso ocorre devido ao ataque do ácido aos contatos metálicos. Além da degradação térmica, o aumento de temperatura também ocasiona a formação de ácido acético levando a um efeito cascata.

Também ocorre amarelamento do encapsulante, sendo uma das principais falhas que comprometem a vida útil do painel fotovoltaico. Como visto anteriormente, os principais fatores que o ocasionam são fatores externos; entretanto, fatores elétricos também podem desencadear as reações. Nestes casos, ocorre um amarelamento a uma coloração castanho-escuro, como observado na Figura 10.



**Figura 10 – Amarelamento de módulos fotovoltaicos**

Fonte: (BRS, 2019).

O amarelamento diminui a absorção da luz solar pelas células. Isso ocorre, pois, a transmitância também é diminuída, de forma a levar a perda de potência. As principais causas disso são: a umidade, alta temperatura (acima de 50°C) e sombreamento, o que pode ocasionar em mudanças da estrutura química do encapsulante (LA MANTIA *et al.*, 2016). Em regiões de climas adversos, onde a temperatura e a umidade são altas, o envelhecimento dos painéis fotovoltaicos ocorre com maior intensidade, diminuindo, assim, a vida útil do dispositivo.

Além disso, o amarelamento do EVA desencadeia outras falhas que também ocasionam a degradação, delaminação, pontos quentes, corrosão das interconexões metálicas e formação de bolhas (OLIVEIRA *et al.*, 2018b).

#### 3.4.2.2 Hot-spots

Os pontos quentes ou *Hot-spots* são pontos nos quais ocorre um aquecimento mais intenso em relação ao restante do módulo fotovoltaico, podendo chegar a 200°C. Isso acontece quando uma ou mais células do dispositivo em série se danificam.

Essas falhas podem resultar em mais falhas e, em muitos casos, chegar até a danificar o dispositivo como um todo. Quanto maior a temperatura, mais evidente fica o dano no módulo fotovoltaico. Na Tabela 2, são apresentadas as consequências dos pontos quentes com diferentes faixas de temperatura (WENDLANDT *et al.*, 2010).

**Tabela 2 – Relação temperatura, efeito causado e consequência em um encapsulante**

Temperatura	Efeito causado	Consequência
<150 °C	Sem efeito	Funcionamento normal
≥150 °C	Fusão com encapsulante	Delaminação
≥170 °C	Descoloração do backsheet	Perda de eficiência do módulo PV
≥200 °C	Destruição irreversível da célula	Perda de eficiência do módulo PV mesmo quando não há sombreamento

Fonte: Adaptado de WENDLANDT *et al.*, 2010.

#### 3.4.3 Contatos metálicos

Contatos metálicos – também chamados de *fingers* – são conectados à extensão do semicondutor para coletar os elétrons fotogerados. Propriedades como condutividade, reflexão da luz e resistência à corrosão são os motivos pelos quais a

prata é o material mais empregado para esse fim, sendo utilizada em 90% de todos os módulos de silício cristalino existentes (PEETERS *et al.*, 2017).

Os *fingers* são adicionados à superfície do semicondutor por meio de um processo térmico (*firing*) de uma pasta de solda contendo prata e, em alguns casos, chumbo. Os filamentos dispõem de uma largura que pode variar de 50  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ , distribuídos por toda a camada semicondutora de silício cristalino.

A fim de reduzir gastos com a prata para conectar as células entre si, os fabricantes preferem utilizar *busbars*, isto é, fitas compostas de metais de menor valor (geralmente de cobre) cobertas por estanho e chumbo. Em alguns casos, a prata está presente nos pontos de soldagem do *busbar*. Em média 6 a 10% da superfície da célula solar é coberta por *fingers* e *busbars* (PEETERS *et al.*, 2017).

#### 3.4.4 Vidros Fotovoltaicos

Os vidros utilizados para a produção dos painéis fotovoltaicos devem possuir propriedades que lhes atribuam alta transmitância de luz (baixo índice de reflexão). De acordo com Couderc *et al.* (2017) e Maruthi *et al.* (2018), existem características que os vidros precisam apresentar para que sejam considerados adequados aos painéis; são elas:

- Baixa concentração de ferro;
- Temperado, para ter uma melhor resistência mecânica garantindo a integridade do painel;
- Espessuras bem finas, variando entre 2mm e no máximo 4 mm;
- Não podem apresentar ondulações, empenos ou qualquer outra irregularidade em suas superfícies;
- Resistência à tração acima dos 50kPa e condutividade térmica acima dos 1,63 W/mK.

#### 3.4.5 Backsheet

O *backsheet* é um material plástico branco, cuja estrutura normalmente é composta a partir de várias camadas. Estas geralmente são feitas de

Tedlar/PET/Tedlar (TPT, 70% do mercado), Poliamida-PET-Poliamida (APA, 10% do mercado) ou ainda de Tedlar-PETPoliamida (TPA).

A camada em contato com o encapsulante deve fornecer aderência e compatibilidade química para com o mesmo, além de ser estável à exposição solar. Materiais como fluoropolímeros, poliamida (PA), polietileno (PE) são normalmente usados para fazer essa camada. Vale frisar que a camada central é geralmente mais espessa e fornece propriedades mecânicas e elétricas necessárias a todo o composto. Esta camada é geralmente feita de poli (tereftalato de etileno) (PET). Já a camada externa, por sua vez, precisa ser altamente confiável e estável, pois ela é responsável por fornecer proteção ambiental para as outras camadas, além de estar diretamente exposta ao ambiente. Portanto, normalmente é feita de PET, poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) ou poli (fluoreto de vinil) (PVF). Estas camadas são comumente laminadas com adição de adesivos (OMAZIC *et al.*, 2019).

#### 3.4.6 Caixa de Junção

A Caixa de junção tem como finalidade proteger o módulo contra a corrente reversa através de diodos e facilitar a saída dos cabos condutores dos painéis fotovoltaicos. Depois do módulo já laminado, a Caixa de junção é presa atrás do painel e os “busbar” são conectados nos bornes da caixa de junção. Nesta, estão instalados os diodos, responsáveis por não permitirem a corrente reversa, que pode ocorrer à noite ou durante sombreamentos. Desta maneira, evita-se que as placas durante à noite funcionem ao contrário, consumindo carga e descarregando a energia armazenada.

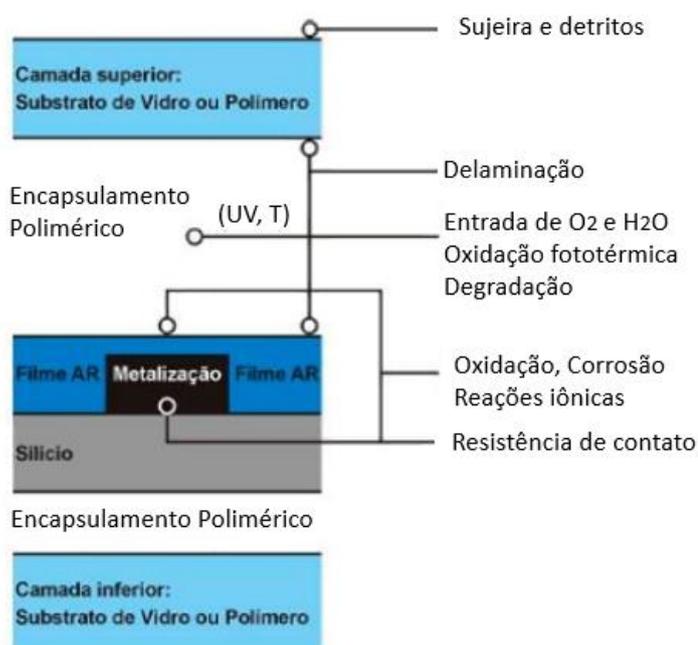
#### 3.4.7 Moldura de Alumínio

Esta tem a finalidade de proteger as extremidades contra agentes atmosféricos, exercendo uma barreira intransponível contra a umidade, ao mesmo tempo que fornece resistência e proteção ao dispositivo. Tal moldura geralmente é feita de alumínio, embora possa ser feita também de outros materiais.

### 3.5 Fim de Vida e os Impactos Ambientais dos Painéis Fotovoltaicos

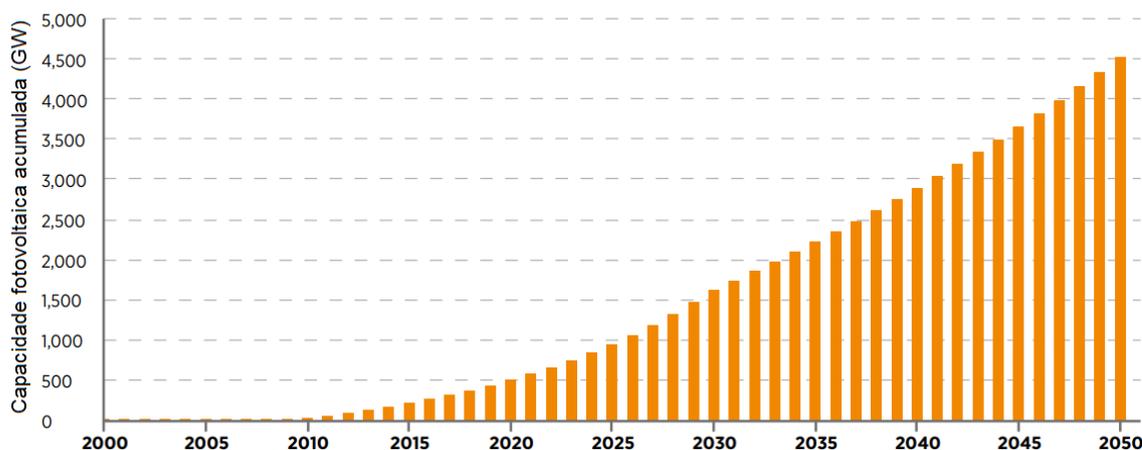
Num primeiro momento, importante elucidar o fato de que os painéis fotovoltaicos apresentam, em média, 25 a 30 anos de vida útil, operando com até 80% de eficiência neste período. Após, a eficiência diminui e considera-se, portanto, que o painel atingiu seu fim de vida (PRADO, 2018).

De acordo com Doi *et al.* (2001) e Kang *et al.* (2012), a deterioração do encapsulante provocada por radiação ultravioleta é a causa determinante diminuição da vida útil dos módulos fotovoltaicos. Entretanto, outros fatores como quebra do vidro e entrada de sujeiras, além de processos de oxidação, reações iônicas e corrosão dos contatos – estes últimos causados pela alta concentração de íons, oriundas do aprisionamento de vapores e gases, algumas vezes por conta do uso indevido de produtos durante sua fabricação – também têm papel crucial no processo (ASSUNÇÃO, 2014). A Figura 11 apresenta os momentos nos quais ocorre cada tipo de deterioração no painel.



**Figura 11 – Principais fatores responsáveis por degradações em módulos fotovoltaicos**  
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA *et al.*, (2017).

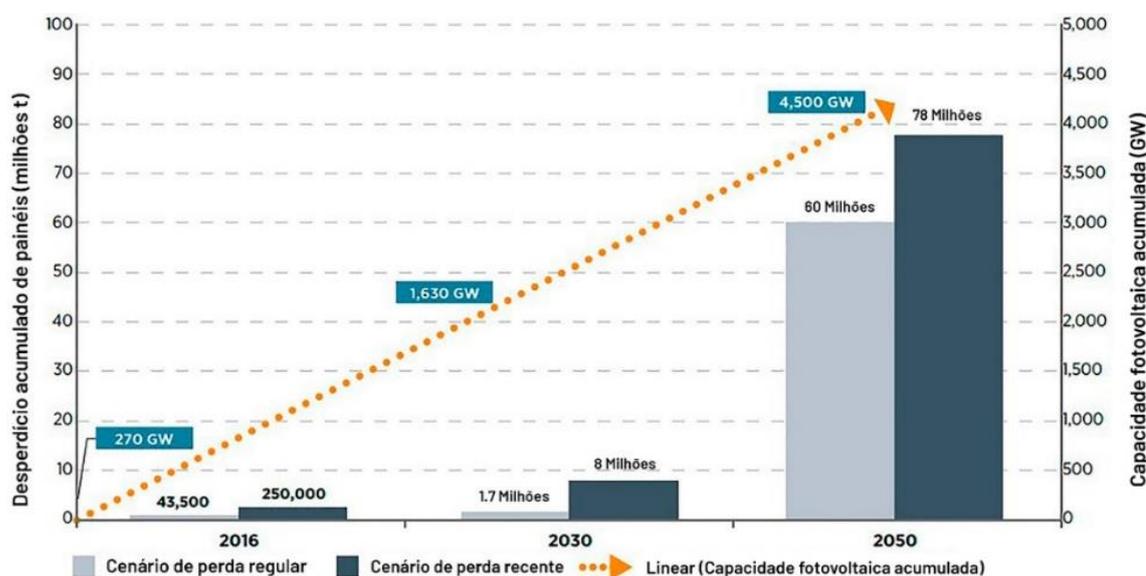
Atualmente, a tecnologia fotovoltaica não está associada à geração de resíduos sólidos. No entanto, conforme mostra a Figura 12, a tendência de crescimento global das instalações de painéis fotovoltaicos fará com que o volume de módulos descartados até 2050 cresça significativamente.



**Figura 12 – Projeção cumulativa da capacidade fotovoltaica global**

Fonte: Adaptado de IRENA e IEA (2016).

Estudos realizados por IRENA e IEA-PVPS (2016) preveem um aumento dos volumes globais de resíduos fotovoltaicos entre 2016 e 2050 (Figura 13), levando em consideração a operação contínua dos painéis fotovoltaicos por 30 anos sem falhas (cenário de perda regular) e, devido a falhas, painéis descartados antes da vida útil de 30 anos (cenário de perda recente).



**Figura 13 – Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos**

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

Essas projeções abrem margem para que se comece a pensar em processos de reciclagem e meios de conscientização a serem adotados futuramente. Hoje, a quantidade destes resíduos ainda é consideravelmente baixa, o que não os torna economicamente atraentes para o desenvolvimento de tais processos. Porém, é

necessário ampliar a compreensão sobre os impactos ambientais que os painéis fotovoltaicos devem causar ao longo dos anos (LUNARDI *et al.*, 2018).

De acordo com IRENA e IEA-PVPS (2016), no fim de 2016, a quantidade de resíduos fotovoltaicos era de 250 mil toneladas, representando apenas 0,1 a 0,6% da massa total dos painéis instalados. Portanto, entre 1,7 e 8 milhões de painéis atingirão o fim de sua vida útil no início da década de 2030 e, em 2050, teremos gerado de 60 a 78 milhões de toneladas de resíduos.

Ao fim de sua vida útil, os painéis fotovoltaicos são, por vezes, descartados em aterros ou lixões. Desta forma, além de desperdiçar metais raros e preciosos, materiais tóxicos não são devidamente tratados (LUNARDI *et al.*, 2018).

Sica *et al.* (2018) afirmam que o descarte em aterro não traz nenhum benefício ambiental ou econômico. Utilizar métodos de reciclagem para tratar corretamente cada resíduo fotovoltaico – de forma a tornar essa tecnologia ainda mais sustentável, recuperando materiais e reduzindo as emissões de dióxido de carbono na atmosfera – deve ser considerado a melhor opção para a diminuição do problema.

Os resíduos são avaliados com base em seus materiais constituintes. A classificação é realizada por categorias, como resíduos inertes (perigosos ou não perigosos). Do mesmo modo, existem subcategorias, como lixo eletrônico, resíduos de construções, entre outras (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Grande parte do peso dos painéis fotovoltaicos é composto por vidro, alumínio e polímeros pertencentes à categoria de resíduos não perigosos. Já como resíduos perigosos, entram os metais (como cádmio, telúrio, chumbo e selênio), que podem ser encontrados em pequenas quantidades e estão associados a diversas doenças em seres humanos.

O padrão de classificação de resíduos utilizado atualmente é chamado *Toxicity Characteristics Leaching Procedure* (TCLP), derivado do inglês e, em tradução livre, “Procedimento de Lixiviação de Características de Toxicidade”. As análises são realizadas em laboratório e seguem regras específicas, pelas quais se determina o tamanho da amostra, o solvente a ser utilizado, temperatura, duração, entre outros fatores. No teste, alguns pedaços dos painéis são colocados em um determinado líquido, a partir de uma quantidade estipulada de tempo, para que então a concentração de algumas substâncias seja observada no lixiviado. Se o material for considerado perigoso, não deve ser descartado em aterros sanitários sem receber tratamento específico (BANG *et al.*, 2018).

Nos Estados Unidos, por exemplo, a concentração de chumbo no lixiviado para ser classificado como resíduo perigoso, é de 5 mg/L. No Japão, o limite é de 0,3 mg/L. E no Brasil, o limite é reduzido para 0,1 mg/L. Para o cádmio, o limite varia de 1 mg/L nos Estados Unidos, até 0,1 mg/L na Alemanha. Entretanto, no Brasil o limite é de 0,5 mg/L (IRENA; IEA-PVPS, 2016; ABNT NBR 10004).

A contaminação feita por esses metais tem diferentes efeitos bioquímicos e fisiológicos, bem como possui um alto potencial de acumulação no meio ambiente e nos seres vivos. Assim que chega ao corpo humano, se dispersa. E, neste momento, pode se acumular nos ossos, causar impactos negativos no sistema nervoso central, sistema imunológico, sistema reprodutor, cardiovascular e no funcionamento renal (MALANDRINO *et al.*, 2017).

Embora os metais considerados potencialmente tóxicos representem menos de 1% da massa dos painéis, eles têm um impacto maior no meio ambiente se comparados aos demais metais que compõem os módulos (XU *et al.*, 2018). Mediante a tendência de crescimento dos painéis fotovoltaicos, os riscos ambientais causados pelo descarte incorreto e pela lixiviação dos contaminantes se tornam preocupantes (CYRS *et al.*, 2014).

Malandrino *et al.* (2017) afirmam que até o ano de 2050, é possível prever o descarte inadequado de 2151,0 toneladas de chumbo, com lixiviação média de 1741,2 toneladas; e 877 toneladas de cádmio, com uma lixiviação média de 302,5 toneladas.

Diante disso, um descarte irresponsável ocasionará a perda de toneladas de materiais que podem ser recuperados e reutilizados, como o alumínio e o vidro, que compõem a maior parte dos painéis, além do silício e demais metais (XU *et al.*, 2018).

A reciclagem pode reduzir os níveis de extração de recursos e o gasto energético da fabricação dos painéis. O esgotamento de recursos ambientais também é uma preocupação e precisa ser levado em consideração.

Nesse sentido, o descarte e gerenciamento adequado de módulos fotovoltaicos pode auxiliar na reciclagem desses materiais, a fim de prevenir problemas ambientais relacionados ao ciclo de vida dos metais e evitar possíveis riscos econômicos devido à escassez de matérias primas.

### 3.6 Legislação

Não há dúvida de que a energia solar está se desenvolvendo rapidamente devido à aceitação do público. No entanto, a falta de uma política para formular leis adequadas para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos tem criado obstáculos para a aplicação de processos de reciclagem em vários países. Contudo, cresce a preocupação pública sobre o manuseio de resíduos metálicos como cádmio (Cd), selênio (Se), chumbo (Pb), entre outros metais usados nos módulos fotovoltaicos. Diante deste cenário, quer seja, o aumento significativo desses resíduos, o governo elaborou legislações e diretivas visando seu gerenciamento (YI, *et al.*, 2016; PRADO, 2018).

No caso da Europa, houve a formulação de regulamentações fortes voltadas para o incentivo à reciclagem. Neste mesmo percurso, outros países começaram a se desenvolver (LUNARDI *et al.*, 2018). Na União Europeia, em 2012, os módulos fotovoltaicos foram classificados como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) na Diretiva Europeia de REEE 2012/19/EU, que implementou a logística reversa tornando-a obrigatória para os fornecedores, fabricantes, importadores e revendedores no final de vida útil dos painéis fotovoltaicos (YI *et al.*, 2016).

Os autores Lunardi *et al.* (2018), Padoan (2019) e Chen *et al.* (2019) afirmam que a reciclagem de módulos fotovoltaicos para recuperar valores de metais, minimizando os resíduos gerados, tornou-se o principal foco da indústria solar, uma vez que os principais objetivos da Diretiva Europeia consistem em manter, proteger e melhorar a qualidade ambiental e a saúde humana, utilizando os recursos naturais de maneira prudente e racional. No entanto, nem todos os países partilham desta mesma preocupação.

De acordo com Yi *et al.* (2018), as empresas do setor precisam coletar e reciclar os módulos que atingem seu fim de vida. Apesar disso, impulsionada pela responsabilidade ambiental, a reciclagem dos módulos na União Europeia iniciou-se de maneira voluntária pela própria indústria. Atualmente, empresas nacionais de fabricação de equipamentos de energia solar cooperam com países europeus para a realização de diversas pesquisas sobre tecnologias de reciclagem (XU *et al.*, 2018).

Neste contexto, a organização sem fins lucrativos *PV Cycle*, foi fundada em Bruxelas, na Bélgica, por membros da indústria fotovoltaica. Nesta, fundada em 2007, o objetivo era fornecer soluções para coleta e gerenciamento de resíduos a partir de um programa voluntário de coleta e reciclagem de módulos em fim de vida útil, com

representantes e parcerias em todo o mundo (PV CYCLE, 2016). Segundo Padoan *et al.* (2019), os fabricantes membros do *PV Cycle* adotam o conceito de responsabilidade do produtor e buscam oferecer uma solução de energia solar totalmente sustentável, que seja responsável pelos módulos fotovoltaicos durante todo o ciclo de vida.

Nos Estados Unidos, por exemplo, não existem legislações específicas para a disposição de resíduos dos módulos fotovoltaicos. Contudo, o órgão ambiental *Environmental Protection Agency* (EPA), submete resíduos ao teste *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*, caso não passem, eles são classificados como resíduos perigosos. Sendo assim, este teste verifica a potencialidade de contaminação do meio ambiente por metais presentes nos resíduos fotovoltaicos (PRADO, 2018).

No Brasil também não há regulamentação específica sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos. A realização da classificação dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) foi incentivada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, instituída em 2010 pela Lei nº 12.305/10) em relação aos seus potenciais riscos ao meio ambiente, que formulou metas a fim de evitar o destinação dos resíduos aos chamados "lixões", com o intuito de acabar com essa modalidade de destinação. Ademais, esta deve ser executada de acordo com a norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a qual indica a periculosidade e o destinação correto de acordo com as classes: I (perigoso), IIA (não perigoso e não inerte) e IIB (não perigoso e inerte). Embora não haja regulamentação própria, os painéis podem ser classificados como equipamento elétrico-eletrônico. Porém, atualmente o país não possui nenhuma norma que especifique a origem, natureza e periculosidade destes resíduos (MIRANDA *et al.*, 2019).

De acordo com o autor Oliveira (2017), a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, define políticas gerais para tratamento e destinação dos resíduos sólidos, sendo aplicada também no gerenciamento de REEE.

Segundo o artigo Nº 33 da referida lei, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos elétricos eletrônicos são obrigados a criar e aplicar sistemas de logística reversa, de forma independente do serviço de limpeza pública e de gestão de resíduos sólidos. A logística reversa é um sistema de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que se baseia em um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta dos

resíduos em seu fim de vida útil e restituí-los ao meio empresarial, para serem reaproveitados ou receberem a destinação final adequada (BRASIL, 2010).

No Brasil, a fiscalização do gerenciamento de REEE não é eficiente, a prática de logística reversa não tem sido devidamente controlada e supervisionada, não sendo eficaz, exceto para determinados tipos de embalagens, como agrotóxicos, pneus, lâmpadas, pilhas e baterias. Entretanto, os resíduos fotovoltaicos, principalmente aqueles não incluídos na NBR 10.004, estão sujeitos a testes de lixiviação semelhantes aos implementados pela EPA nos EUA, os quais são regulados pela norma "NBR 10.005/2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos" (MIRANDA *et al.* 2019).

### 3.7 Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos

A tecnologia dos painéis fotovoltaicos permite a geração de energia elétrica 100% limpa, convertida diretamente da luz do sol. Todavia, apesar de durarem entre 25 e 30 anos, ao final de sua vida útil os painéis precisam ser descartados de maneira a causar o menor impacto possível ao meio ambiente. Para isso, todo seu ciclo de vida deve ser avaliado.

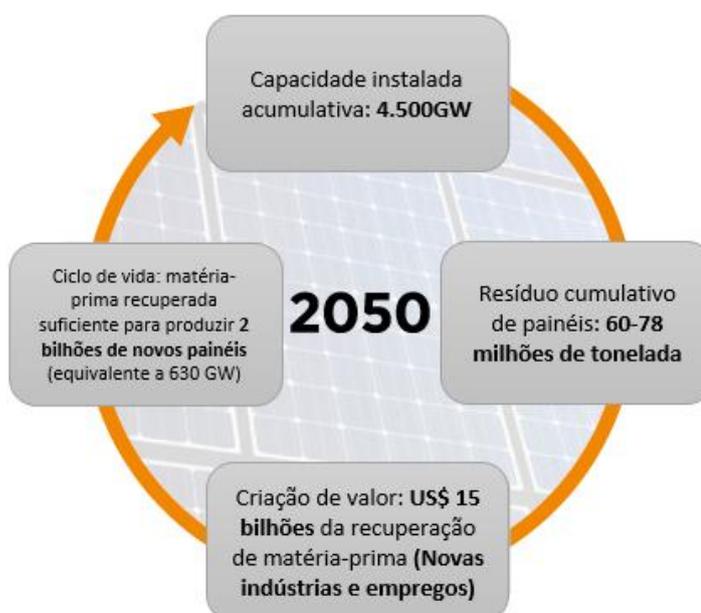
A análise de ciclo de vida (ACV) é um procedimento de várias etapas, no qual o impacto ambiental de um produto ou serviço durante sua vida útil é analisado. Dessa forma, é possível avaliar os estágios do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos desde a extração de matéria-prima até o gerenciamento do fim de vida, como mostra a Figura 14.



Figura 14 – Estágios do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos  
Fonte: DabliW Sol Energia.

O primeiro estágio do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos é a manufatura. Neste processo ocorre o maior consumo de energia, pois requer diversas etapas, recursos e elementos químicos diferentes. Por outro lado, o processo operacional é a fase em que o painel é utilizado para gerar energia e requer apenas manutenção adequada. Quanto ao processo de desconexão, este se inicia quando o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos chega ao fim e termina com o descarte – na maioria das vezes em aterros sanitários – ou algumas poucas vezes com a reciclagem.

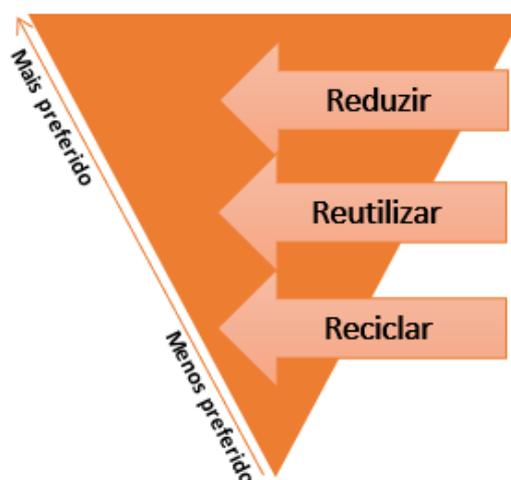
Como citado anteriormente, mais de 78 milhões de toneladas de equipamentos fotovoltaicos serão acumulados mundialmente até 2050. Com isso, o potencial de valor das matérias-primas desbloqueadas pela reciclagem deverá ultrapassar os 15 bilhões de dólares, o que equivale à matéria-prima necessária para produzir 2 bilhões de novos painéis fotovoltaicos, conforme mostra a Figura 15.



**Figura 15 – Painéis fotovoltaicos acumulados mundialmente até 2050**

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

Atualmente, a quantidade de resíduos ainda é muito baixa e o custo da reciclagem dos módulos é superior ao valor dos materiais recuperados. No entanto, existem alguns princípios clássicos de redução de resíduos que já podem ser aplicados à gestão de painéis fotovoltaicos em fase de descarte final. São os chamados 3R's: redução, reutilização e reciclagem. A Figura 16 mostra estes princípios, indicando os mais e menos preferidos.



**Figura 16 – Opções para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (3Rs)**

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

Em países que fabricam módulos, a redução do número de materiais utilizados na composição dos painéis fotovoltaicos deve ser o foco principal, sendo que para poupar recursos naturais este método de gestão é o mais importante. O crescimento exponencial deste mercado e a previsão da escassez de recursos necessários para a fabricação de módulos têm impulsionado a criação de tecnologias mais eficientes na perspectiva de exigir uma menor quantidade de matéria-prima.

Segundo pesquisas da IRENA e IEA-PVPS (2016), até 2030, a quantidade de materiais utilizados na fabricação de painéis solares apresentará uma tendência decrescente. A longo prazo, a gestão de resíduos através da redução traz benefícios ambientais em relação aos módulos em fim de vida útil, pois a tendência de gerar menos resíduos evita o desperdício. Essa é a primeira estratégia do gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos.

A reutilização é a segunda estratégia. Trata-se de painéis nos quais reparos podem ser realizados, verificando se é viável ou não consertar os defeitos apresentados e, a partir disso, repassar para revenda. Em alguns países, a comercialização de painéis usados já é possível por meio de plataformas, a um custo reduzido após passar por inspeções de qualidade e reformas. No entanto, nestes casos há uma eficiência inferior à de um painel novo (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

A reciclagem é a última estratégia, que só se aplica se os painéis não puderem ser reaproveitados (MIRANDA, 2019). De acordo com Padoan *et al.* (2019), a reciclagem de painéis fotovoltaicos é um tema controverso, dado que os métodos apresentam vantagens e desvantagens. No processo mecânico de reciclagem,

observa-se como vantagem o baixo custo. Porém, não é possível recuperar materiais de alto valor, sendo necessário aplicar um processo complementar. Estes incluem métodos térmicos que requerem alto consumo de energia e, além disso, devido à emissão de gases tóxicos produzidos durante o processo, não são indicados.

A utilização de processos químicos nestes procedimentos se torna fundamental, pois estes ainda são o principal método de recuperação de metais, utilizando-se de solventes e reagentes. Os processos químicos têm como vantagem a alta pureza obtida a partir dos metais recuperados. Entretanto, os impactos ambientais e econômicos são altos. Em função disso, faz-se necessário desenvolver métodos que possibilitem recuperar os reagentes utilizados em tais procedimentos (PADOAN *et al.*, 2019).

Porém, mesmo considerando os efeitos negativos dos métodos de reciclagem dos painéis fotovoltaicos, como custo dos reagentes e emissão de gases, esses processos ainda são eficazes, pois o uso de filtros de emissão de gases e o tratamento de águas residuais dos processos, além do reaproveitamento dos reagentes, podem amenizar esses problemas (PADOAN *et al.*, 2019).

A reciclagem do vidro fotovoltaico deve ser priorizada, pois em volume, a cobertura de vidro é o principal componente da maioria dos painéis solares c-Si. Com uma espessura média de 3 mm, é responsável por cerca de 7,5 kg/m<sup>2</sup> de peso, o que exige uma capacidade de produção industrial massiva para produzir milhões de painéis por dia (BURROWS & FTHENAKIS, 2015; FISCHER *et al.*, 2020).

Ainda assim, os painéis bifaciais c-Si estão sendo amplamente implantados em todo o mundo e devem dominar o mercado na próxima década, de forma que aumentará a demanda pela produção de vidro plano. A indústria do vidro já consome muita energia e emite quantidades significativas de carbono na atmosfera (GU *et al.*, 2020; FISCHER *et al.*, 2021).

Na Europa, por exemplo, Schmitz *et al.* (2011) contabilizaram uma emissão média de 0,74 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de vidro plano produzido. Tal valor pode mudar drasticamente de uma planta para outra devido ao uso de diferentes fontes de calor, entretanto, a demanda de energia direta e as emissões de carbono em qualquer linha de produção de vidro plano serão as mesmas. Desta forma, para produzir 1 kg de vidro pode-se esperar uma demanda de energia entre 2-3 kWh, devido às altas temperaturas de fusão (1500-1600 °C), e emissões diretas de carbono de cerca de 0,2 kg, devido aos carbonatos usados como matéria-prima.

Pesquisadores de todo o mundo têm abordado esse desafio iminente de reciclar esses materiais, que parece fundamental para recuperar minerais escassos e permitir a implantação de painéis fotovoltaicos de multi-terawatts, enquanto poderia reduzir a demanda de energia, emissões de carbono, extração de matéria-prima e contribuir para um desenvolvimento mais sustentável (TAO & YU, 2015; SICA *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018; DENG, *et al.*, 2019; MAHMOUDI *et al.*, 2019; CHOWDHURY *et al.*, 2020).

## 4. MÉTODOS

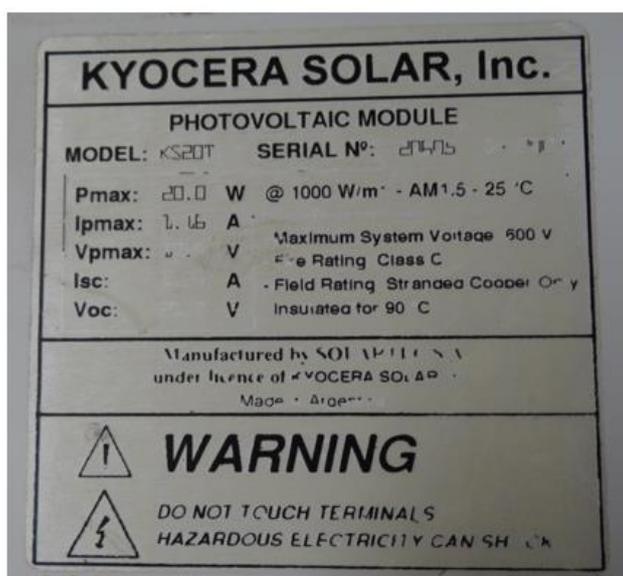
### 4.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO: ESPECIFICAÇÕES

O módulo fotovoltaico para realização dessa pesquisa foi cedido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Pato Branco da marca Kyocera Solar, modelo KS20T, conforme especificações mostradas na Tabela 3, e Figura 17.

**Tabela 3 – Especificações do módulo fotovoltaico**

Eficiência	11,0%
Potência máxima (Pmax)	20 Wp
Tolerância	+5%/-0%
Tensão em circuito aberto (Voc)	21,7 V
Tensão de Pico (Vmpp)	17,4 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	1,26 A
Corrente de Pico (Impp)	1,16 A
Voltagem máxima do sistema	1000 V
Tipo de célula	Silício Policristalino
Dimensões painel	520 x 352 x 35 (mm)
Moldura	Alumínio
Peso	2,4 kg

\*Condição Padrão de Teste: Irradiação de 1000W / m<sup>2</sup>, Espectro de Massa de Ar 1.5 e Temperatura de Célula de 25°C.



a)

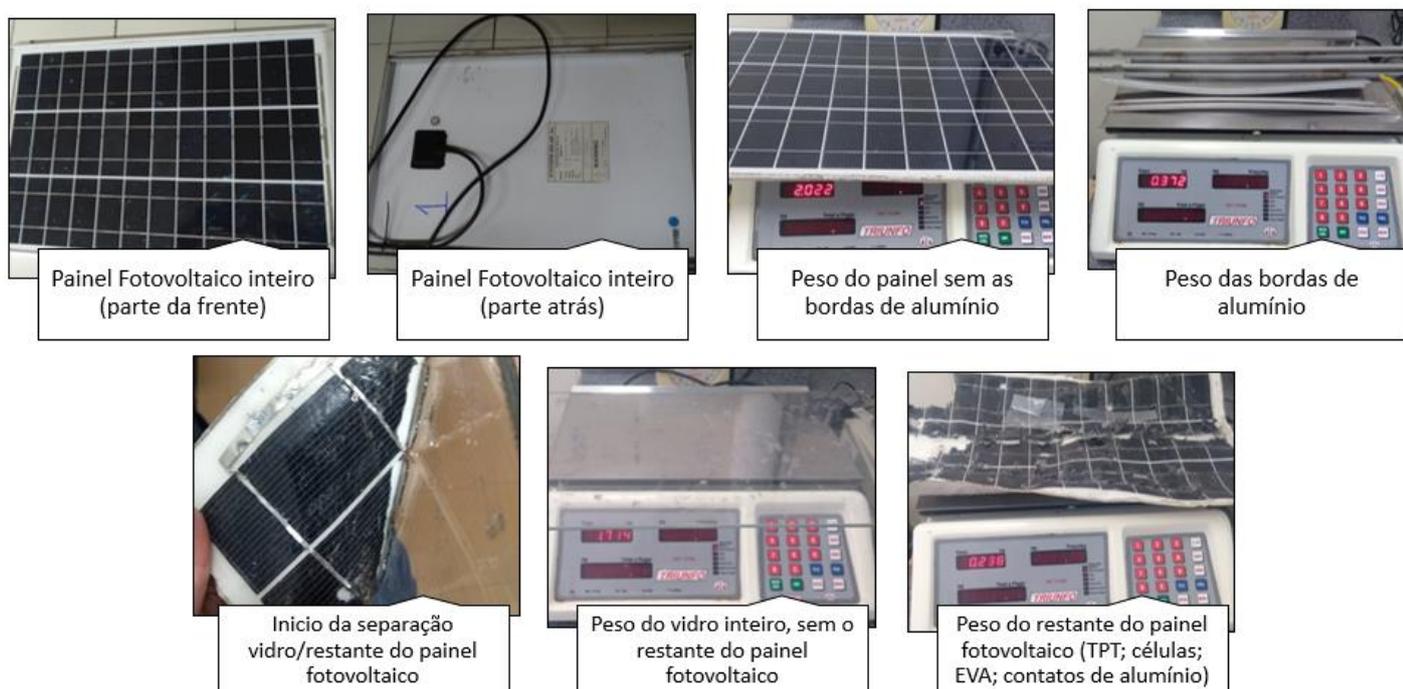


b)

**Figura 17 – a) Especificações do módulo fotovoltaico, b) Módulo fotovoltaico**

#### 4.1.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO: SEPARAÇÃO MANUAL

O módulo fotovoltaico foi desintegrado manualmente. Inicialmente, a separação foi pelas bordas de alumínio. Após isso, o módulo foi aquecido a 80°C por alguns minutos, em uma estufa para o EVA se soltar do vidro, assim conseguindo retirar o vidro inteiro do restante dos componentes do módulo fotovoltaico. Conforme mostra a Figura 18.



**Figura 18 – Fotografias do módulo fotovoltaico em processo de desintegração física**

Componente	Peso (g)
Vidro	1714
Alumínio	372
Outros	308
<b>Total</b>	<b>2394</b>

#### 4.1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO: DELAMINAÇÃO POR SOLVENTE

Nesta etapa, a fim de separar os componentes presentes nas amostras do módulo, foram utilizados 7 solventes da marca Merck, como Acetona, Ácido Acético Glacial, Álcool Isopropílico, Etanol, Hexano, 4-Metil-2-Pentanona e Tetrahydrofurano, com e sem agitação. No entanto, foi necessário que o módulo fosse cortado em pedaços de 2x2cm para fazer a imersão dos mesmos.

A dissolução foi realizada em béqueres de 250 mL sob temperatura e pressão ambiente. Aproximadamente utilizaram-se 100 mL de solvente para  $\cong$  5g do módulo fotovoltaico. Nas amostras sobre imersão incluíam-se o encapsulante, backsheet e semiconductor. Os módulos cortados foram submersos no solvente e mantidos por 5 dias com e sem agitação, verificando a cada 24 horas. Ao final do experimento, as amostras foram separadas utilizando filtração e realizada a secagem em uma estufa, como mostrado na Figura 19, logo abaixo e realizado as análises pertinentes.



Figura 19 – Fotografias das amostras em delaminação por solvente

## 4.1.4 FLUXOGRAMA EXPLORATÓRIO

A Figura 20 apresenta um fluxograma contendo todas as etapas a serem desenvolvidas neste trabalho.

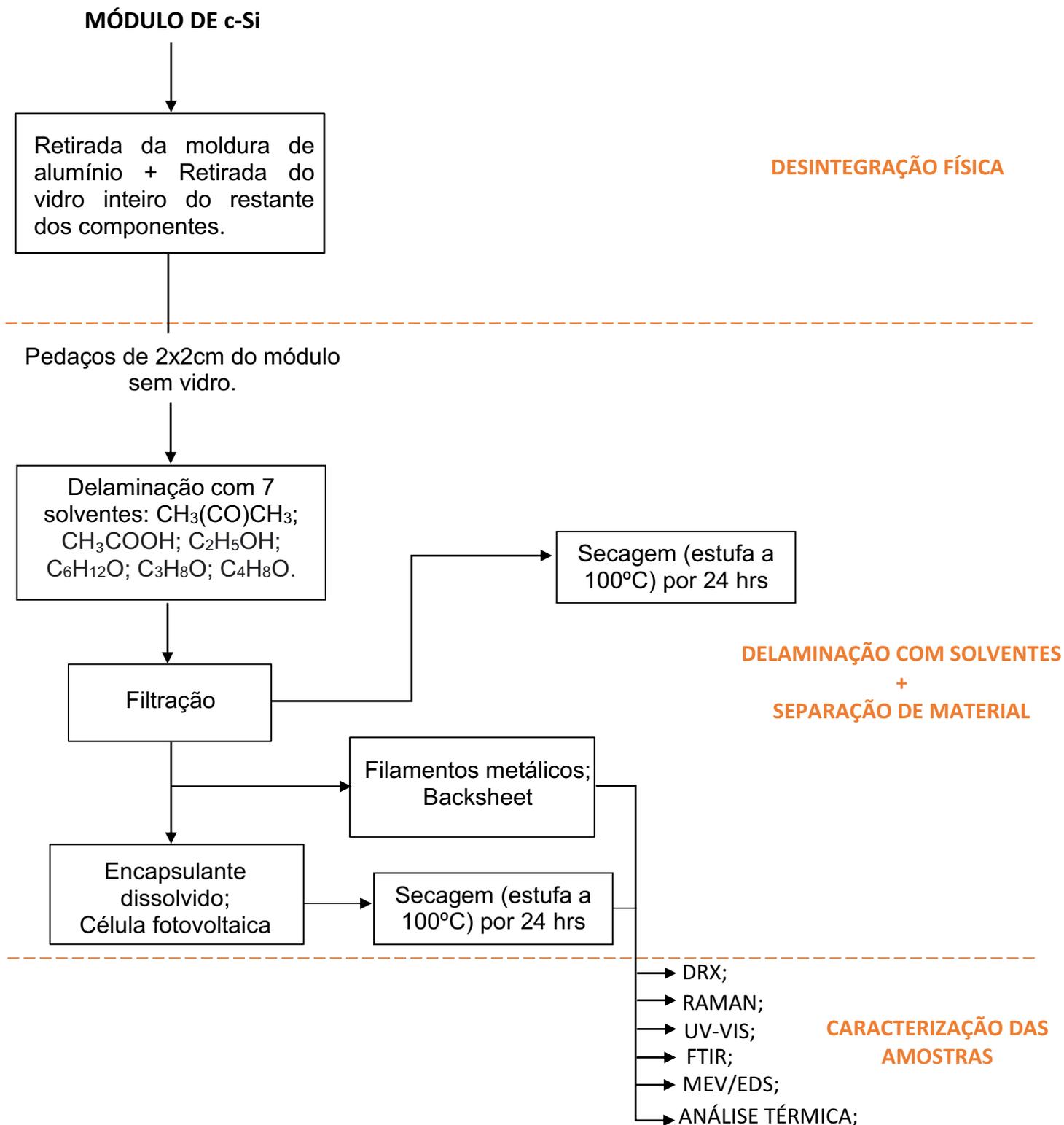


Figura 20 – Fluxograma das atividades realizadas

## 4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

### 4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)

O MEV será empregado neste trabalho com o objetivo de se analisar a morfologia tanto do silício como dos eletrodos. As medidas foram realizadas pelo equipamento Hitachi, modelo TM3000 na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Pato Branco, que possui filamento de tungstênio (W) emitindo em 5 kV, 15 kV.

### 4.2.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia – (EDS)

Com a finalidade de identificar qualitativamente a composição do bachsheet e dos filamentos metálicos, foi empregada a técnica EDS. As medidas foram realizadas por um Microscópio Eletrônico de Varredura – Shimadzu, modelo SS-550, numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50 kV na Central de Microscopia (CMI) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

### 4.2.3 Difratometria de raios X – (DRX)

A difratometria de raios X foi utilizada neste trabalho com o intuito de se analisar as fases cristalinas do silício. Os difratogramas foram registrados por difratômetro Rigaku, modelo Miniflex 600 (40 kV e 15 mA), com radiação de cobre ( $\text{CuK}\alpha$   $\lambda=1,5418$  Å) em intervalo de ângulo de Bragg de  $3^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$  com passo de  $0,02^\circ$  e tempo de contagem fixo de 2 segundos por passo em modo semi-contínuo (*step scan*). As análises foram conduzidas na Central de Análises da UTFPR campus Pato Branco. As fases foram indexadas por meio da comparação dos dados experimentais com o banco de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*).

### 4.2.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier – (FTIR- *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

A fim de se verificar as características estruturais dos polímeros EVA e TPT, após o contato com os solventes, empregou-se a técnica FTIR. As medidas foram

realizadas na Central de Análises da UTFPR campus Pato Branco em equipamento Perkin Elmer Frontier, na faixa de número de onda 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , resolução de 1  $\text{cm}^{-1}$  e número de acumulações igual a 32, por reflectância total atenuada (ATR).

#### 4.2.5 Análise Térmica

A análise termogravimétrica (TGA), Análise Térmica Diferencial (DTA), Termogravimetria Derivada (DTG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), foram empregadas neste trabalho com o intuito de avaliar a decomposição térmica dos polímeros EVA e TPT. As medidas foram conduzidas em equipamento SDT – Q600 na Central de Análises da UTFPR campus Pato Branco. Aproximadamente 5 mg de amostra foram aquecidas em porta amostra de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  da temperatura ambiente a 800  $^\circ\text{C}$  à taxa de 10  $^\circ\text{C min}^{-1}$  em atmosfera de nitrogênio à vazão de 100  $\text{mL min}^{-1}$ .

#### 4.2.6 Espectroscopia de Absorção Óptica – (UV-Vis)

Com o intuito de avaliar a qualidade de transparência do vidro do painel fotovoltaico foi empregado a técnica UV-Vis. As análises foram conduzidas em equipamento Perkin Elmer, modelo LAMBDA 45 na região de 190 a 1100 nm, com leituras de absorbância linear até 3,5A ( $R^2 = 0,99$ ) utilizando lâmpadas de tungstênio e deutério na Central de Análises da UTFPR campus Pato Branco.

#### 4.2.7 Espectroscopia de Micro-Raman – (RAMAN)

O microscópio equipado com três lasers, possibilitando excitações em 532, 633 e 785nm, também é equipado com um microscópio com três lentes objetivas (20X, 50X e 100X) e o sinal é coletado por uma câmera CCD refrigerada. As medidas foram realizadas na Central de Microscopia (CMI) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) em equipamento Micro Raman Confocal (Senterra, Bruker) o laser em excitação de 532nm com 2mW de potência, com grade de difração de 1200 linhas/mm, sendo focado com lente objetiva de 20X e uma fenda de 50x1000 $\mu\text{m}$ , número de acumulações igual a 40, com tempo de integração de 0,1 segundo.

## 5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados resultados obtidos por meio das técnicas de caracterização descritas na Seção 4.1.

As amostras foram produzidas conforme a metodologia descrita anteriormente na Seção 4.

### 5.1 Separação do vidro temperado e da célula fotovoltaica usando solventes orgânicos

A recuperação do vidro temperado pode chegar a 100%. A cobertura de vidro em um painel solar de silício é responsável por cerca de 2/3 do peso do dispositivo e, no final da vida útil, esses painéis devem ser reciclados para reduzir o impacto ambiental da indústria. Vários estudos que fazem a delaminação química dos painéis fotovoltaicos, geralmente usam algum processo complicado e difícil de ser usado na prática.

Os métodos de reciclagem geralmente exigem que o painel seja quebrado, o que mantém a cobertura de vidro em fragmentos de baixo valor. Aqui, demonstramos que a cobertura de vidro pode ser recuperada – sem quebrar, triturar ou fundir – por meio de um processo mecânico (manual) sem precisar passar por nenhum processo químico com o uso de solventes. No qual, devido à sua resistência química e mecânica, o vidro poderia ser reutilizado imediatamente em outro painel solar ou, ainda, como material de arquitetura ou outra aplicação, trazendo assim importantes economias de seu conteúdo energético e emissão de carbono relacionado à sua produção (Figura 21).



**Figura 21 – Vidro recuperado por processo mecânico**

De acordo com o experimento com os 7 solventes, o que obteve o melhor resultado da separação do EVA e o restante da célula fotovoltaica foi o Tetrahidrofurano entre os outros 6 solventes, conforme mostra a Tabela 5. No qual, foi gasto menos tempo completando o processo de expansão e decomposição. O Tetrahidrofurano não pode dissolver o polímero EVA de forma abrangente em pouco tempo, porém, ao total de 48h a amostra com agitação obteve separação completa. A Figura 22, mostra o processo de separação do módulo fotovoltaico – sem o vidro – com o solvente Tetrahidrofurano, em um total de 48 horas.

**Tabela 5 – Status das amostras imersos nos solventes**

Solvente	12h c/ agitação	12h	24h c/ agitação	24h	36h c/ agitação	36h	48h c/ agitação	48h	60h c/ agitação	60h	72h c/ agitação	72h
Acetona	σ	σ	σ	σ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	ε	Δ
Ácido Acético Glacial	σ	σ	σ	σ	Δ	σ	Δ	σ	Δ	σ	ε	σ
Álcool Isopropílico	σ	σ	σ	σ	σ	σ	Δ	σ	Δ	σ	ε	σ
Etanol	σ	σ	σ	σ	σ	σ	Δ	σ	Δ	σ	ε	σ
Hexano	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	ε	ε
4-Metil-2- Pentanona	σ	σ	Δ	σ	Δ	σ	Δ	Δ	ε	Δ	ε	Δ
Tetrahidrofurano	σ	σ	Δ	Δ	ε	ε	λ	ε	–	–	–	–

Legenda: σ: Não separado

Δ: Inchado

ε: Separado parcialmente

λ: Separado

Fonte: Adaptado de Chen et al., (2019)



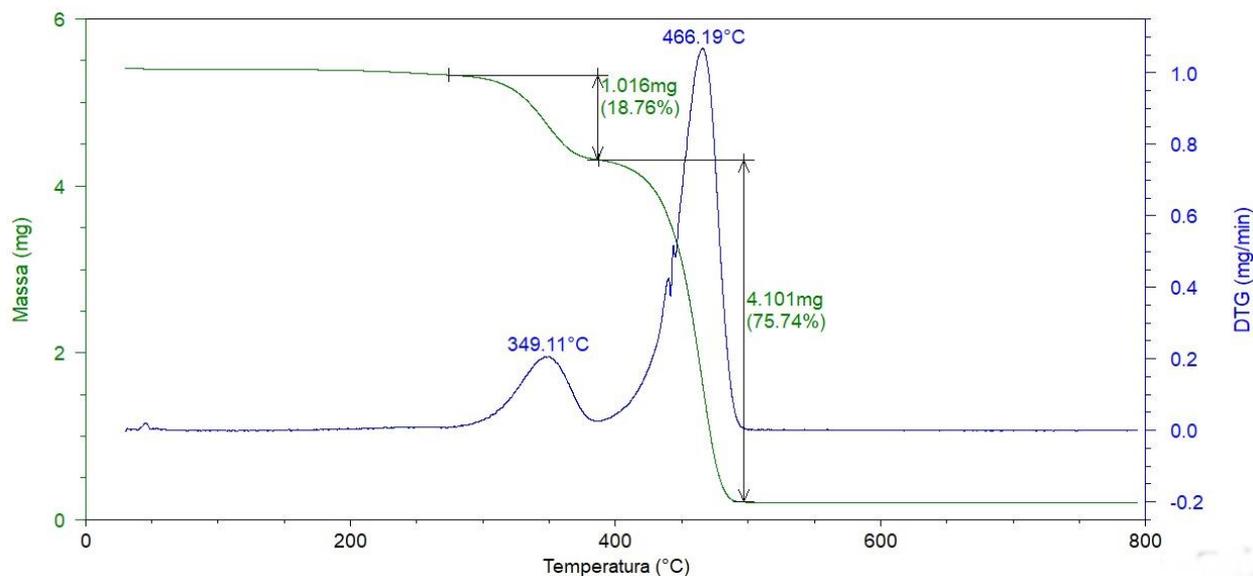
Figura 22 – Amostra obtida após 48 horas por delaminação por solvente com o reagente Tetrahidrofurano

## 5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

### 5.2.1 Análise Térmica

A fim de avaliar o comportamento térmico dos polímeros encontrados no módulo fotovoltaico, as amostras foram submetidas à análise termogravimétrica (TGA), análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria derivada (DTG).

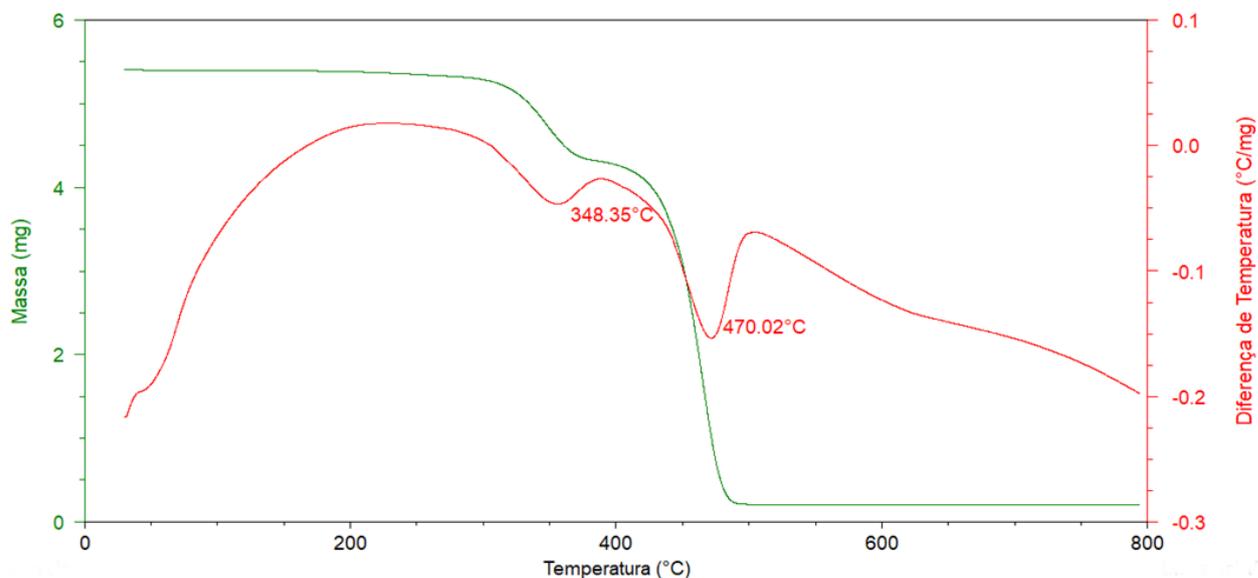
A Figura 23 apresenta o perfil térmico da amostra de EVA retirado do módulo fotovoltaico.



**Figura 23 – Curva DTG do EVA do módulo fotovoltaico**

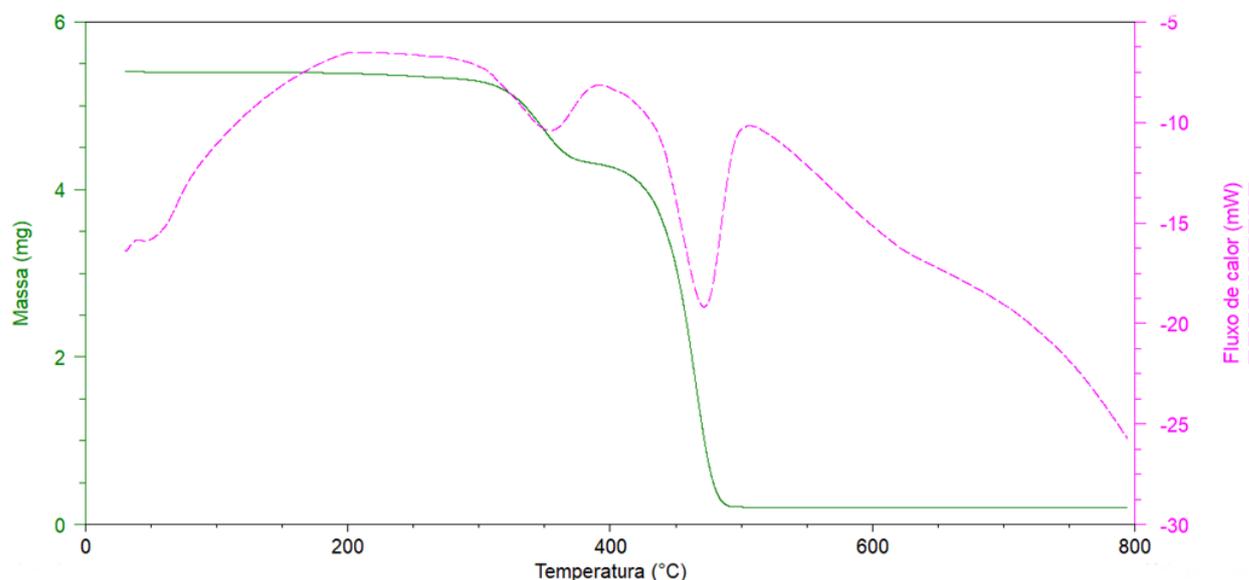
A partir da análise do termograma é possível identificar dois eventos térmicos. O primeiro ocorreu entre as temperaturas de 290 – 380 °C e resultou em uma perda de massa de 18,76%, enquanto o segundo ocorreu entre 390 – 490 °C e resultou em uma perda de massa de 75,74%. Segundo Fiandra *et al.* (2019), Han *et al.* (2019), e Oliveira (2018), o primeiro evento de perda de massa corresponde a evolução do ácido acético, na qual ocorre a reação de desacetilação, devido à decomposição de grupos de acetato de vinila, considerando que nesta faixa se constata um evento exotérmico centrado em 349,11 °C. O segundo evento possivelmente se refere à decomposição completa da cadeia principal do EVA, visualizada por um pico exotérmico situado em 466,19 °C no perfil de DTA.

A curva DTG apresentada na Figura 24, revelou duas etapas de decomposição cujos picos se localizam em temperaturas próximas às observadas – em 348,35 °C e 470,02 °C – para os picos de DTA, corroborando com os demais resultados.



**Figura 24 – Curva DTA do EVA do módulo fotovoltaico**

A análise DSC mede fluxo de calor, detectando os picos das reações químicas que acontecem devido ao consumo ou liberação de calor. Logo após a fusão do polímero, vários picos exotérmicos indicam que a decomposição térmica ocorreu em diferentes processos (FIANDRA *et al.*, 2019). A Figura 25 apresenta as curvas de TGA e DSC do EVA.

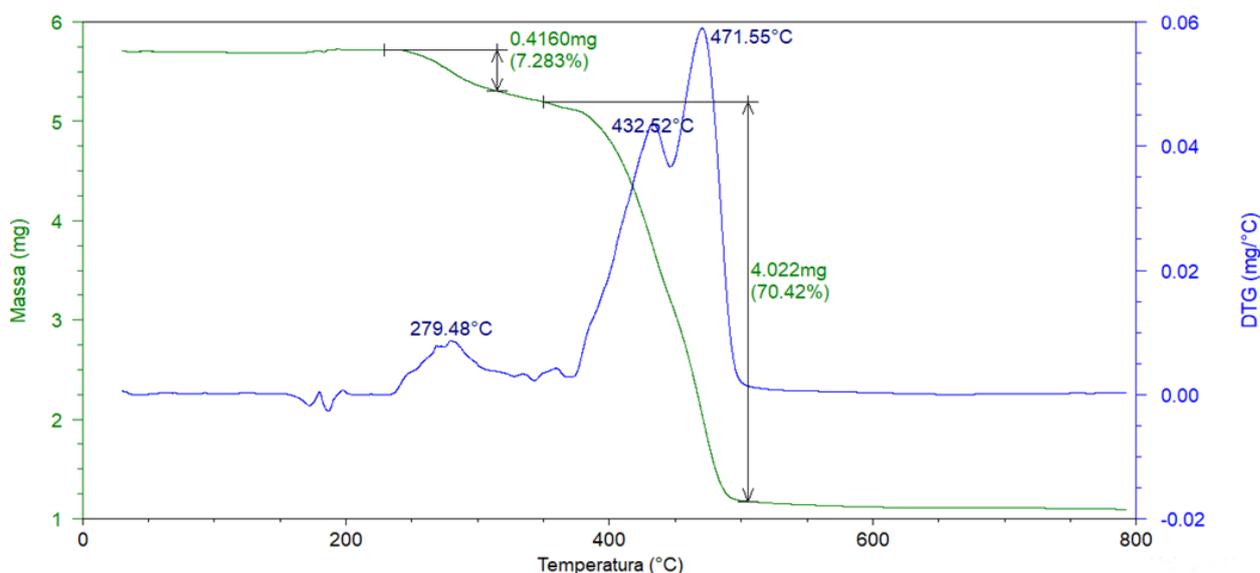


**Figura 25 – Curva DSC do EVA do módulo fotovoltaico**

Conforme visualizado no termograma da Figura 25, quando a temperatura se aproxima de 500 °C, todo o material presente na análise é decomposto. Isso mostra que uma pirólise a 500 °C pode eliminar todo o polímero presente no módulo fotovoltaico. As etapas observadas neste trabalho e nos trabalhos dos autores Fiandra

*et al.* (2019), Han *et al.* (2019), e Oliveira (2018) se assemelham, apesar de haver sutis diferenças nas temperaturas em que as perdas de massa são registradas.

As curvas de Análise Termogravimétrica (TGA), Análise Térmica Diferencial (DTA) e Termogravimetria Derivada (DTG) referentes ao backsheet são ilustradas logo abaixo na Figura 26.

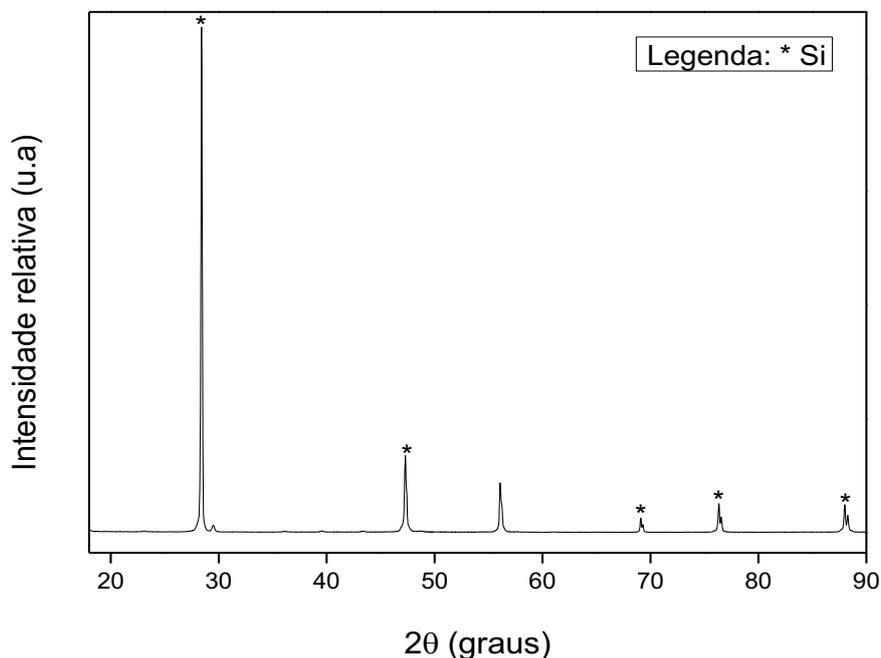


**Figura 26 – Curvas TGA/DTG/DTA do Backsheet do módulo fotovoltaico**

### 5.2.2 Difractometria de raios X – (DRX)

A Figura 27 apresenta o difratograma do silício recuperado do módulo fotovoltaico após a separação.

As posições dos picos de difração foram comparadas com as fichas cristalográficas da base de dados *Inorganic Crystal Structure Database* – ICSD com o objetivo de se realizar a indexação. As fases obtidas puderam ser atribuídas às fichas cristalográficas: 00-027-1402, 01-077-2107.

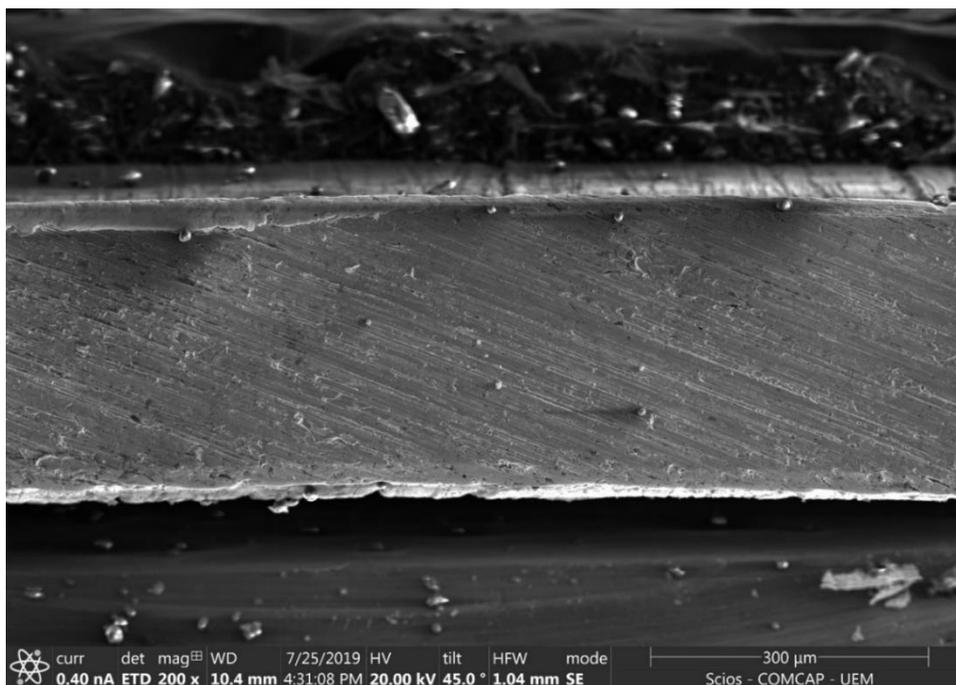


**Figura 27 – Difratograma do silício do painel fotovoltaico após o processo de separação**

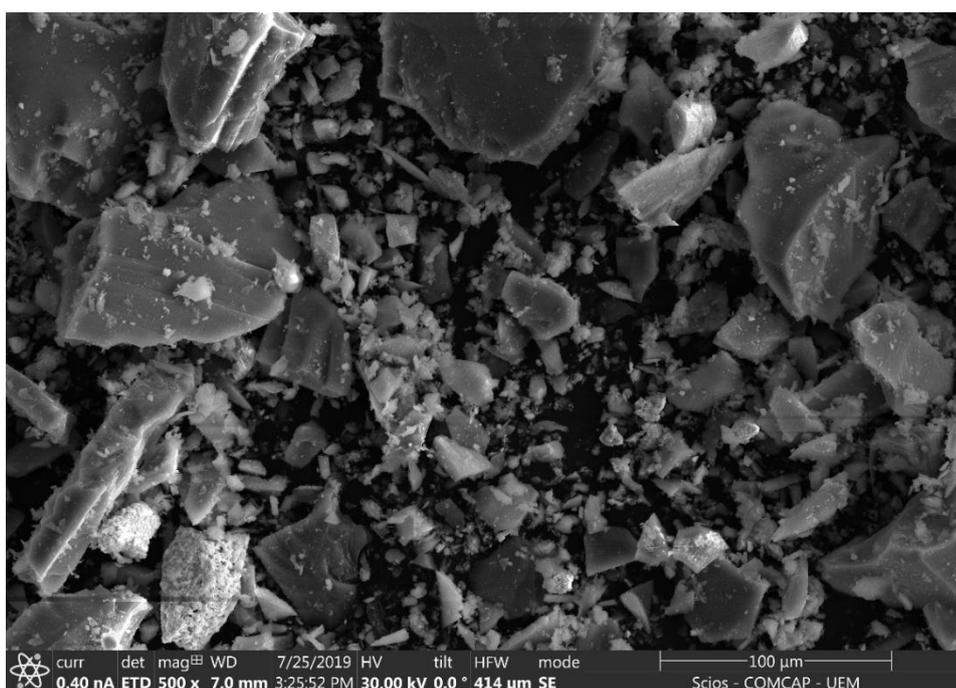
A análise do banco de dados com as fichas cristalográficas, indicam o silício alfa (silício, syn), sendo mais provável para o painel fotovoltaico, o que é consistente com a literatura e com as especificações do fabricante. Os picos mostrados na Figura 27 são os picos identificados nas amostras do módulo fotovoltaico.

### 5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura com detectores de energia dispersiva de raios X (MEV-EDS)

As Figuras 28 e 29 mostram as imagens de MEV obtidas da superfície do eletrodo do painel fotovoltaico, eletrodo transversal e do pó do silício adquirido após a separação dos materiais, respectivamente, com ampliações de 300 e 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 28 – Eletrodo transversal ampliado 300 μm**



**Figura 29 – Pó do silício ampliado 100 μm**

A técnica de EDS foi empregada com o intuito de se analisar a composição elementar semi-quantitativa das amostras.

Os espectros de EDS obtidos para as amostras de pó do silício retirado do módulo fotovoltaico revelaram a presença dos elementos estanho (78,2 %), chumbo

(10,7 %), níquel (1,3 %) e carbono (9,8 %). Essas concentrações estão de acordo com os padrões indicados em literatura.

A Figura 30 apresenta o espectro de EDS da região da amostra da superfície do eletrodo.

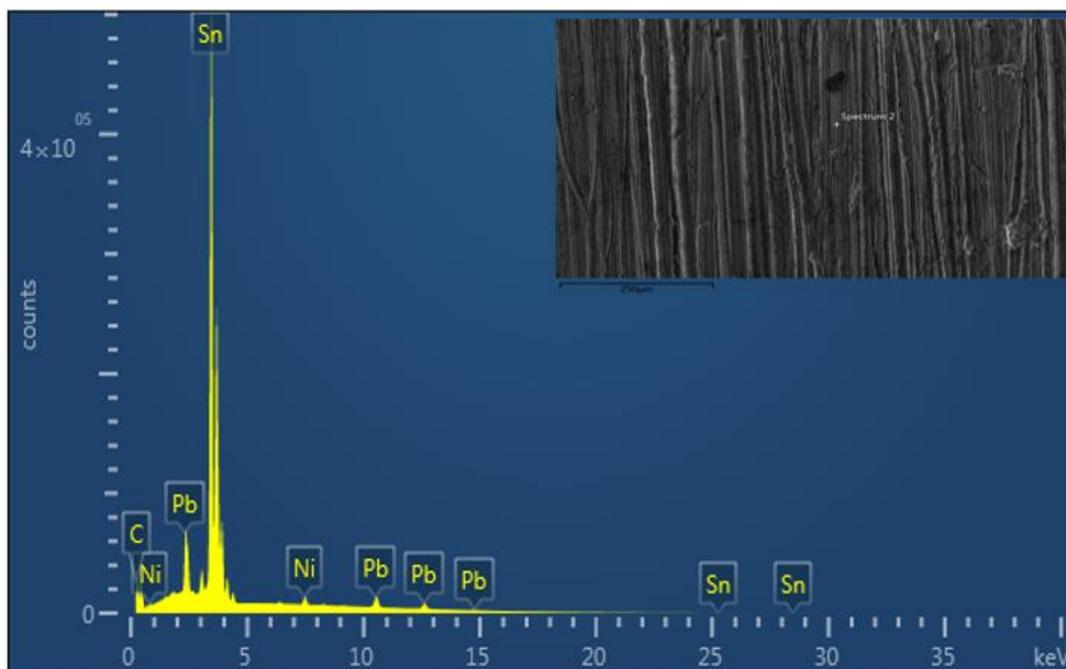


Figura 30 – Espectro de EDS da superfície do eletrodo

Os espectros de EDS obtidos para as amostras do eletrodo revelaram a presença dos elementos cobre (76,8 %), carbono (9,2 %), estanho (5,3 %), alumínio (3,9 %), chumbo (3,5 %) e prata (0,3 %).

A Figura 31 apresenta o espectro de EDS da região da amostra transversal do eletrodo.

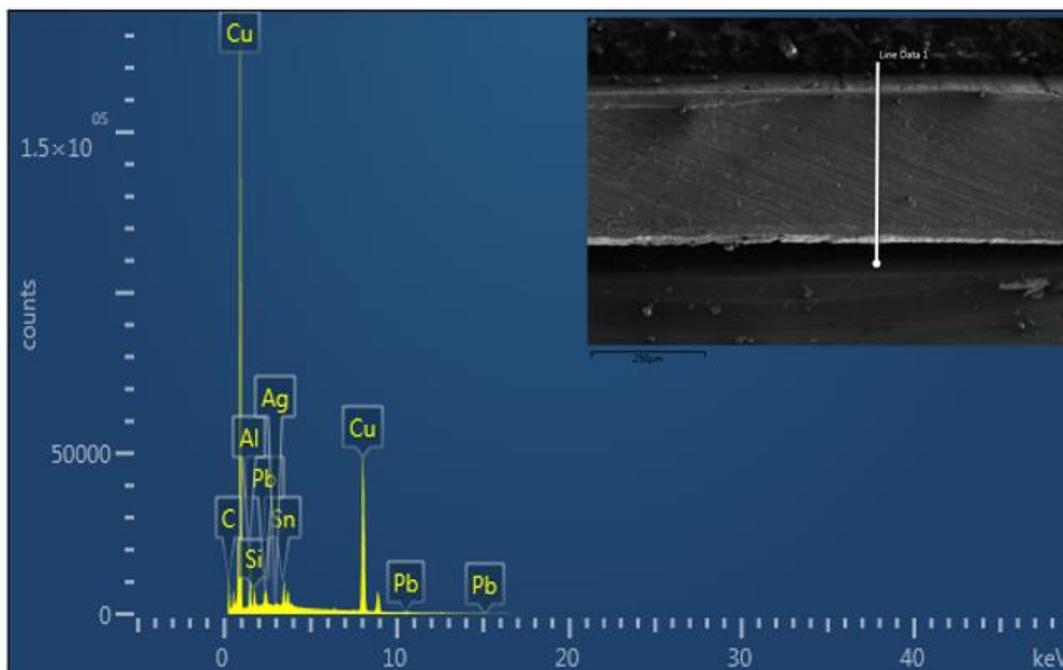


Figura 31 – Espectro de EDS transversal do eletrodo

A análise de EDS revelou que a superfície mais clara do eletrodo do painel fotovoltaico é composta por prata e estanho. O material mais escuro predominantemente observado na superfície do eletrodo é composto por cobre, conforme mostra na Figura 32.

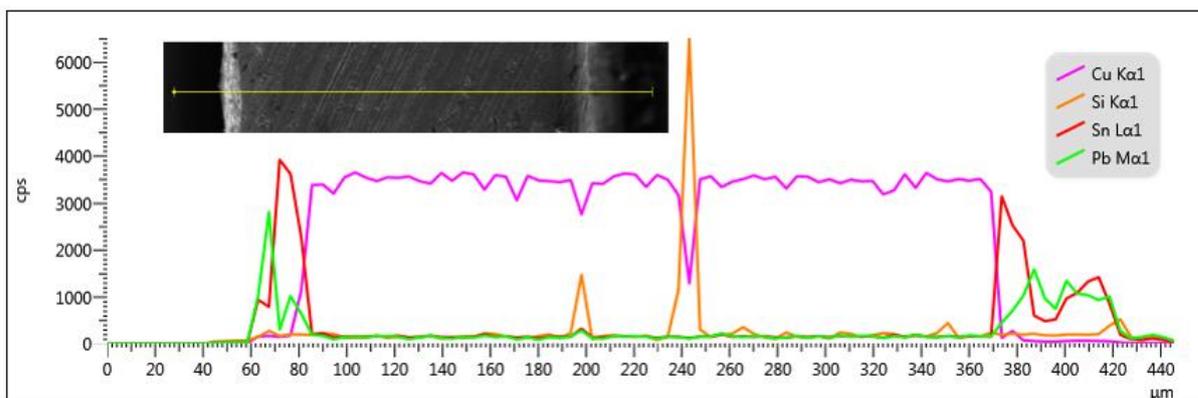


Figura 32 – Espectro de EDS transversal do eletrodo

Os espectros de EDS obtidos para as amostras de pó do silício (Figura 33) revelaram a presença dos elementos silício (63,4 %), oxigênio (21,3 %), carbono (11,7 %), alumínio (1,5 %), prata (0,8 %) e chumbo (0,7 %) e estanho (0,5 %).

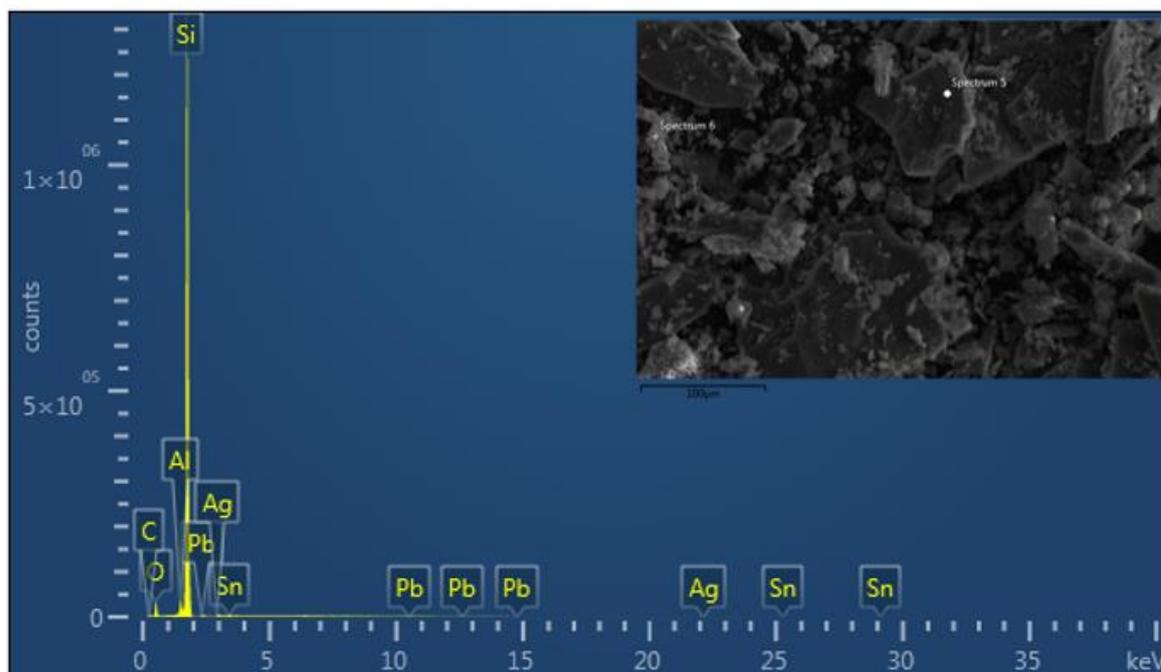


Figura 33 – Espectro de EDS do pó de silício

As medições de EDS foram realizadas em alguns pedaços da folha laminada que permaneceram, após a separação da lamínula, a fim de confirmar a presença de vários elementos-chave. Além do silício, pudemos identificar facilmente estanho, chumbo, cobre e prata, tais resultados corroboram com a literatura (DIAS *et al.*, 2016).

Na Europa, a soldagem de chumbo não é permitida desde 2011 na maioria dos dispositivos eletrônicos. Os painéis fotovoltaicos estão excluídos desta restrição, mas a indústria espera que em 2030 as tecnologias de células solares sem chumbo dominem o mercado (FISCHER *et. al.*, 2021).

### 5.3 ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA

#### 5.3.1 Espectroscopia de transmissão na região do infravermelho com transformada em Fourier – (FTIR-ATR)

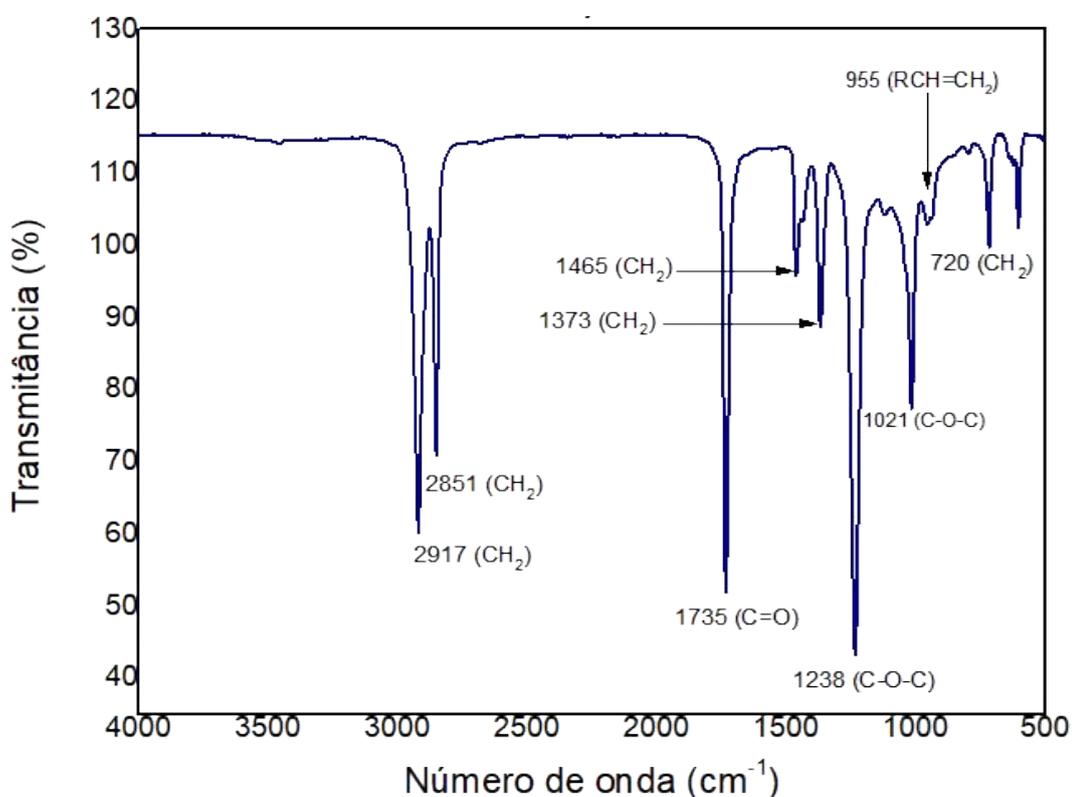
A técnica de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR) foi utilizada como ferramenta complementar para elucidar as estruturas presente neste trabalho, permitindo caracterizar e investigar a degradação de polímeros através da identificação de espécies químicas (grupos carbonílicos, carboxílicos entre outros), que são produtos de reações características do processo

de degradação por radiação, e que podem ser caracterizadas pela observação das bandas características de absorção na região do infravermelho. Foi analisado o mecanismo de degradação do EVA por meio das bandas correspondentes aos grupos químicos, conforme mostra na Tabela 6.

**Tabela 6 – Bandas analisadas nos espectros de FTIR-ATR para as amostras do encapsulante EVA em vários reagentes**

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional e modos vibracionais
2917	estiramento assimétrico C–H de CH <sub>2</sub>
2851	estiramento simétrico C–H de CH <sub>2</sub>
1735	estiramento de C=O
1465	estiramento assimétrico de –CH <sub>2</sub> –
1373	C–H dobra simétrica da vibração de –CH <sub>3</sub>
1238	estiramento assimétrico de C–O–C
1021	estiramento assimétrico de C–O–C
955	deformação angular fora do plano RCH=CH <sub>2</sub>
720	<i>rocking</i> interno da vibração de –CH <sub>2</sub> –

Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).



**Figura 34 – Principais bandas analisadas nos espectros FTIR-ATR para o EVA do módulo fotovoltaico e seus respectivos grupos funcionais**

As análises de FTIR revelaram (Figura 34) que os espectros do EVA obtidos podem ser constatados pelas bandas identificadas em valores de números de onda semelhantes aos da literatura, as bandas fortes em torno de  $2917\text{ cm}^{-1}$  e  $2851\text{ cm}^{-1}$ , o que se deve à existência de estiramento assimétrico e simétrico de C–H. O ácido acético e acetaldeído são os principais produtos que podem acarretar o amarelamento do encapsulante, tendendo ao amarelo escuro e ao marrom (OLIVEIRA, *et. al.*, 2019; LYU, *et. al.*, 2017; JENTSCH, *et. al.*, 2015; CARVALHO, 2011).

Devido à vibração do estiramento C=O da carbonila éster possui a banda em  $1735\text{ cm}^{-1}$ , característico do modo vibracional derivado da rápida reação de criação de estruturas cetônicas por meio de reações de fotólise do tipo Norrish III. Enquanto as bandas em  $1238\text{ cm}^{-1}$  e  $1021\text{ cm}^{-1}$  que foram atribuídas, respectivamente, a deformação de  $\text{CH}_3$ , e são responsáveis pela vibração de estiramento assimétrico de C–O–C, sendo típicas da presença do grupo acetil na cadeia polimérica. Além disso, foi identificadas as bandas de absorção localizadas em  $1465\text{ cm}^{-1}$ ,  $1373\text{ cm}^{-1}$  e  $720\text{ cm}^{-1}$ , associadas ao modo *rocking* interno da vibração de  $-\text{CH}_2-$ , essas bandas demonstram a quebra de segmentos da cadeia de poliacetato de vinila (OLIVEIRA, *et. al.*, 2018a; 2018b; JENTSCH, *et. al.*, 2015).

### 5.3.2 Espectroscopia de Micro-Raman

O espectro Raman típico da amostra de EVA é mostrado na Figura 35. Assim como os picos correspondente às vibrações de alongamento  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  são mostrados na Tabela 7, logo abaixo.

**Tabela 7 – Bandas analisadas nos espectros de Raman para as amostras do encapsulante EVA**

Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo funcional
1295	$-\text{CH}_2-$
1438	$-\text{CH}_2-$
2843	$-\text{CH}_2-$
2880	$-\text{CH}_2-$
2939	$-\text{CH}_3-$

Fonte: Adaptado de PEIKE *et al.*, (2011)

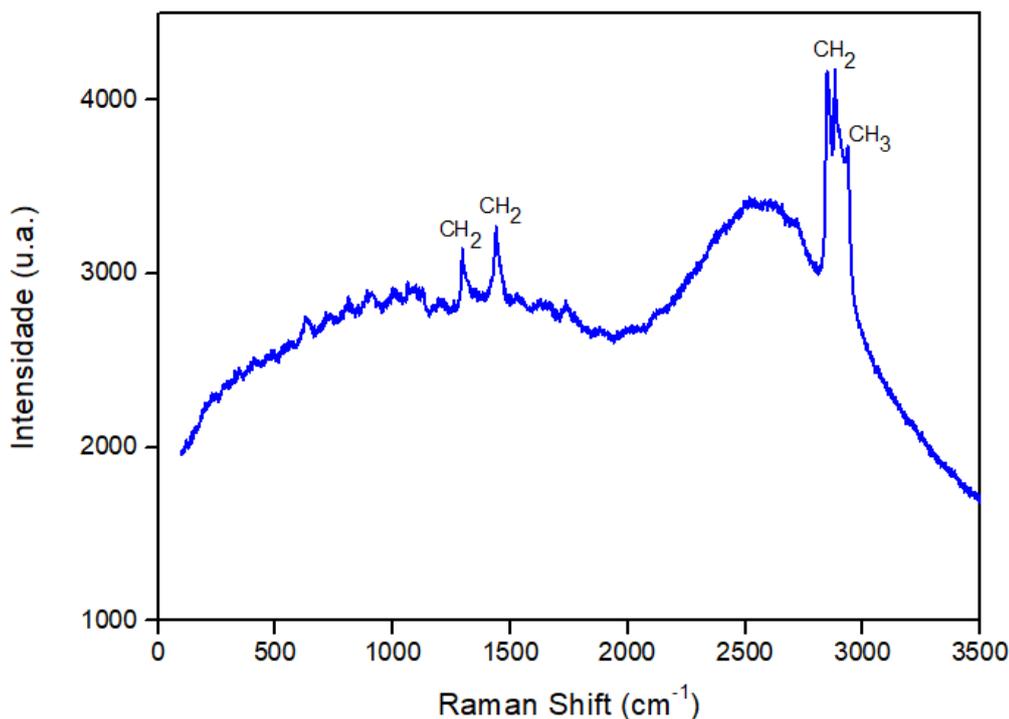
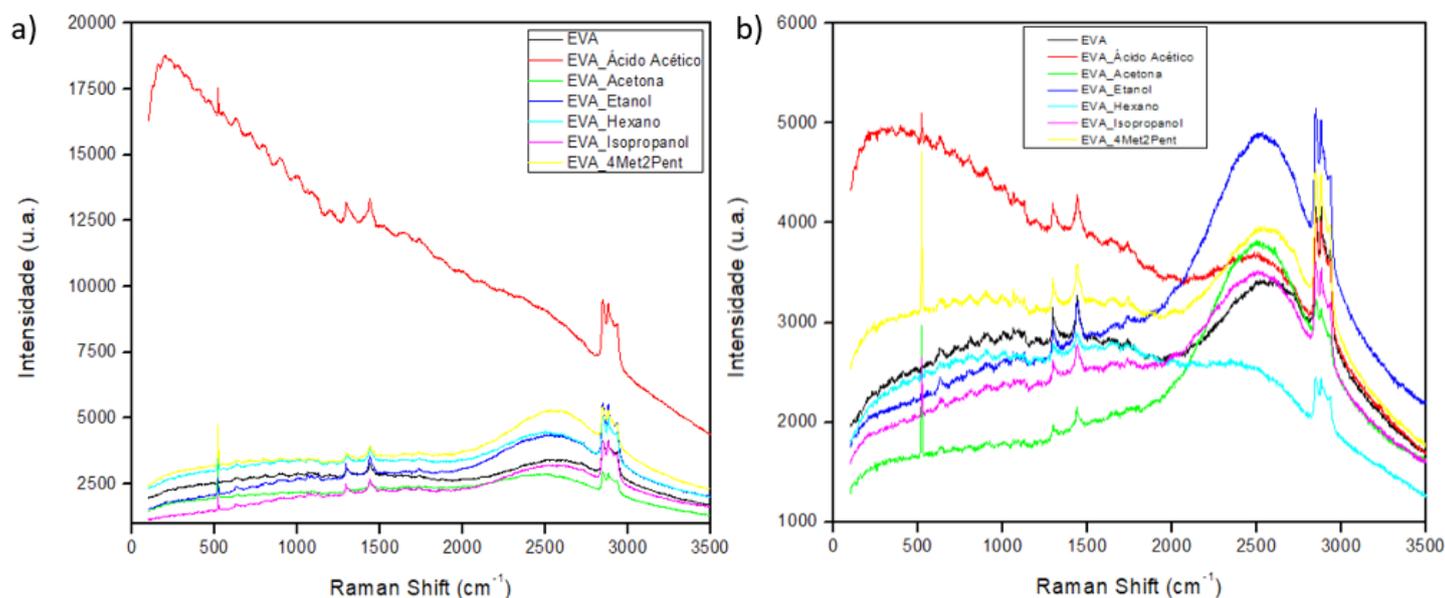


Figura 35 – Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico

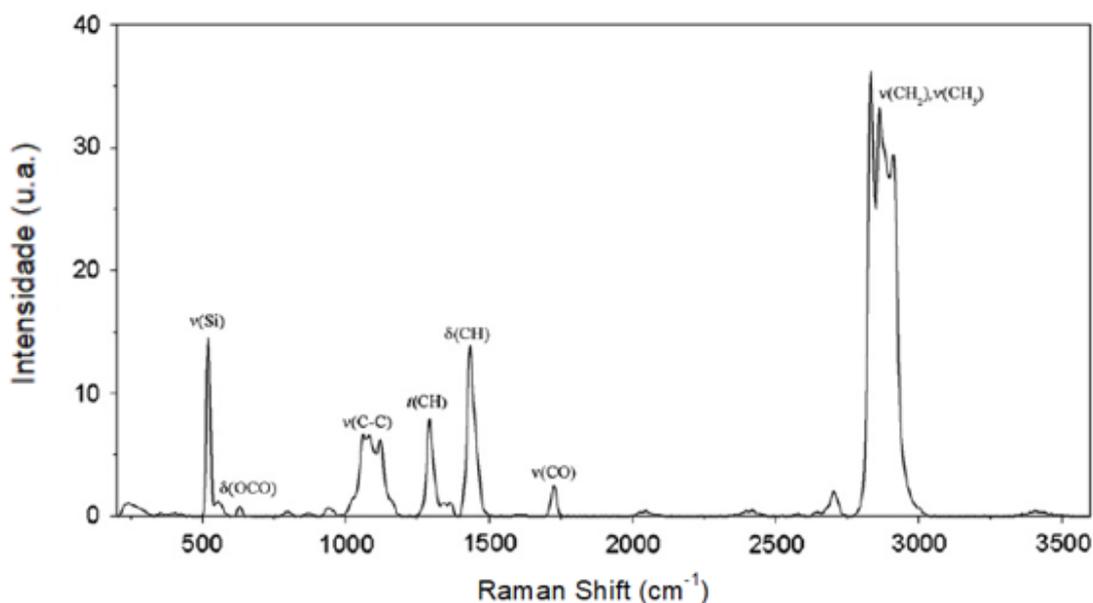
A espectroscopia Raman foi realizada sob bombeamento de 532 nm e, como se pode ver na Figura 35, também mostra algumas linhas características do EVA. Além disso, pode-se observar uma emissão ampla e intensa que é atribuída à luminescência, pois tal resultado é semelhante a outros encontrados na literatura (SCHLOTHAUER, *et. al.*, 2012; LYU, *et. al.*, 2017). Vale ressaltar que várias substâncias bloqueadoras de UV e outros aditivos podem ser incluídos no EVA pela indústria fotovoltaica, e não sabemos tais detalhes sobre a composição original do EVA no módulo fotovoltaico utilizado neste estudo.

No entanto, a luminescência EVA tem sido usada para quantificar a degradação, tanto como funções de dose de radiação solar (JENTSCH, *et. al.*, 2015) ou profundidade de penetração (LYU, *et. al.*, 2017), e poderíamos esperar que, como nosso estudo de caso, o painel tivesse sido exposto ao Sol por vários anos. Neste ponto, não havíamos investigado a degradação do EVA o suficiente e não podemos dizer como isso pode facilitar nosso processo de delaminação manual do módulo KS20T. Como a composição encapsulante e a reticulação podem mudar de um fabricante para outro, nosso método proposto para recuperar a cobertura de vidro ainda precisa de uma investigação mais aprofundada para confirmar se poderíamos aplicá-lo a qualquer painel fotovoltaico no mercado.

Nos espectros com e sem agitação observa-se um pico em  $521\text{ cm}^{-1}$  (Figura 36), segundo cita o autor Peike *et al.*, (2011) esse pico é característico do metal Silício, conforme mostra na Figura 37.



**Figura 36 – a) Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico com os solventes sem agitação; b) Espectro Raman do EVA do módulo fotovoltaico com os solventes com agitação**

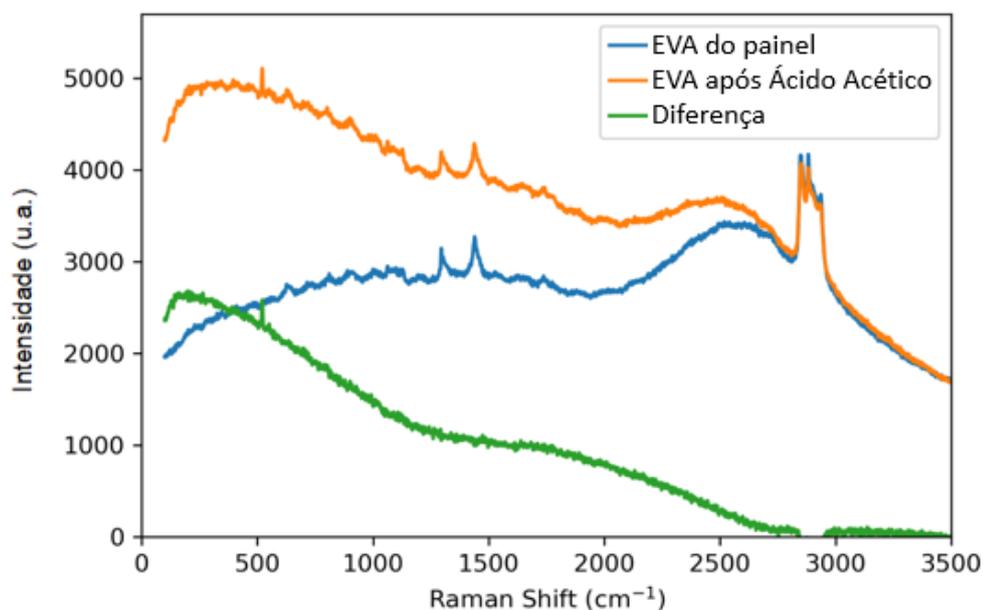


**Figura 37 – Espectros Raman típicos de módulo de Silício não envelhecido com encapsulamento EVA**

Fonte: Adaptado de PEIKE *et al.*, (2011)

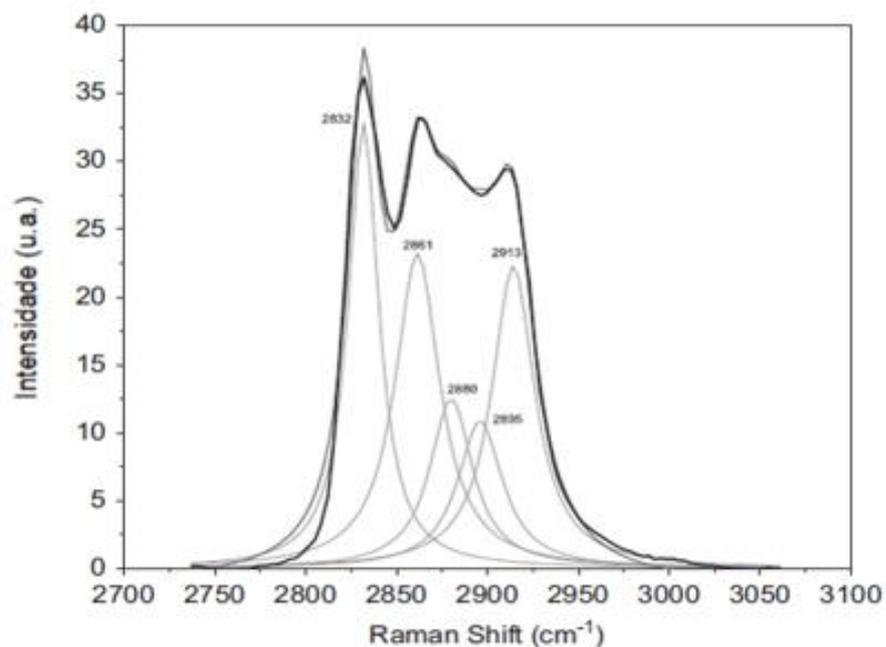
Na Figura 38, logo abaixo do EVA e o EVA após a imersão com o solvente ácido acético, subtraindo essa curva do EVA do painel (sem ter passado por

solventes), fica claro que há uma banda bastante larga – chamada de diferença – esse tipo de banda não é Raman, ainda que tenhamos observado no espectro. O detector do equipamento de Raman, é extremamente sensível a luz, não sendo capaz de diferenciar a origem da luz que chega no sensor.



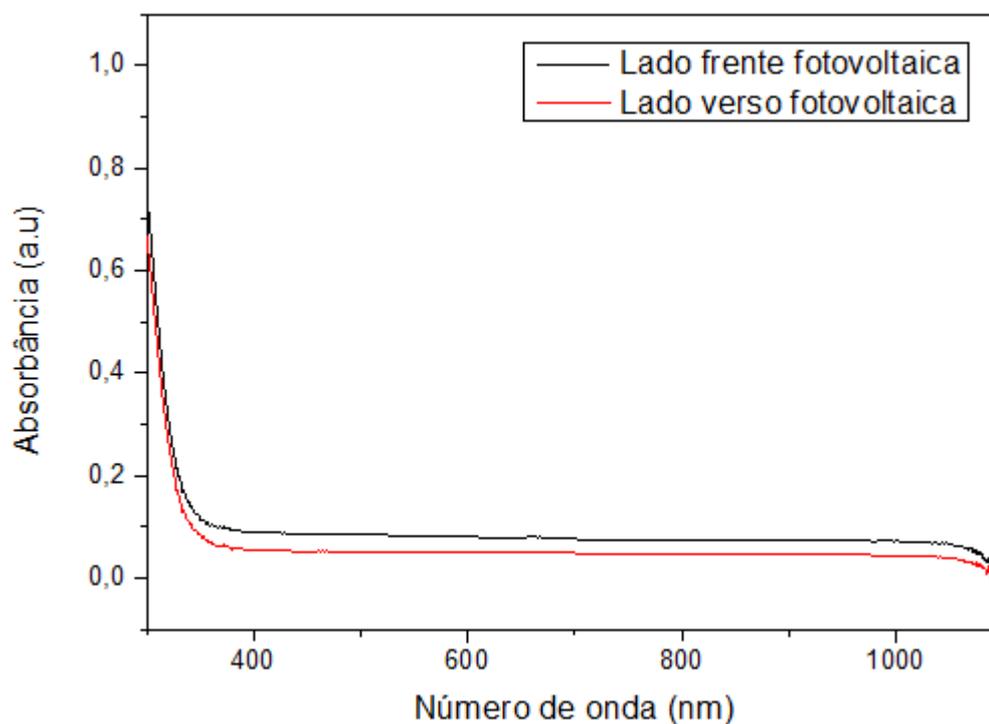
**Figura 38 – Diferença no EVA do módulo e EVA após imersão com o solvente Ácido acético**

Como observamos nos espectros das Figuras 35, 36 e 38, os picos entre 2800-3000 cm<sup>-1</sup> tem uma deconvolução da região de vibração de alongamento CH, no qual o os autores Peike *et al.* (2011) fazem um ajuste Lorentzian para mostrar outros picos – “escondidos” – nesta região, os picos foram encontrados em 2832, 2863, 2880, 2895 e 2913 cm<sup>-1</sup> (Figura 39), basicamente os autores afirmam que essas vibrações originam-se de alongamento CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub> simétricas e anti-simétricas. Tais resultados se assemelham com os resultados deste trabalho.



**Figura 39 – Sinal Raman da região de alongamento CH, mostrando a deconvolução da banda com cinco sinais Lorentzianos**  
 Fonte: Adaptado de PEIKE *et al.*, (2011)

### 5.3.3 Espectroscopia de Absorção Molecular – (UV-Vis)



**Figura 40 – UV-Vis do vidro retirado do módulo fotovoltaico**

As medidas de espectroscopia de absorção óptica indicam que há uma pequena diferença na absorbância das duas superfícies (face externa e face de

contato com encapsulante (EVA)) mostrado na Figura 40. Até certo ponto essas diferenças são esperadas, uma vez que no processo de fabricação uma das superfícies do vidro fica em contato com Estanho durante a “flotagem”, que resulta em um índice de refração ligeiramente diferente nessa superfície.

Além disso, após anos de exposição a intempéries, a superfície externa do vidro, que esteve em contato com água e poluentes, pode ter sofrido algum tipo de degradação, aumentando o espalhamento da luz. No entanto o UV-VIS mostra um vidro transparente, sem sinais óbvios de degradação por UV. O que justifica a reciclagem do vidro inteiro sem triturar/moer, pois é um vidro plano, temperado com uma boa qualidade óptica.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível recuperar o vidro no módulo fotovoltaico sem o uso de solventes, conseguindo recuperar também as bordas de alumínio somente com a desintegração física.

Resultados de FTIR e Raman podem detectar algumas das principais linhas características do EVA. Raman sob bombeamento de 532 nm demonstrou alguma luminescência, que foi interpretada como um sinal de envelhecimento. O EDS confirmou a presença de vários metais comumente encontrados em painéis de c-Si. DRX confirmou que as células fotovoltaicas são de silício. As análises térmicas permitiram identificar a picos da decomposição do EVA. Também foi possível separar o silício/metais minoritários do EVA com o solvente Tetrahidrofurano após 48 horas sobre agitação. E por fim, o UV-Vis indica uma boa qualidade no vidro, podendo ser reutilizado.

Por fim, o desenvolvimento de tecnologias eficientes de reciclagem de vidro para painéis fotovoltaicos é essencial, no qual os resultados desse trabalho indicam que a delaminação mecânica simples pode ser ampliada para recuperar milhões de lâminas de vidro de painéis fotovoltaicos. Com isso, a conservação de energia estimada pode variar na ordem de 10 TWh devido à demanda evitada para a produção de novas lamínulas de vidro e, entre outros benefícios, cerca do equivalente à metade do peso do vidro seria economizado em emissões de carbono.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar se é viável o uso do solvente Tetrahidrofurano, bem como o custo e possibilidade de recuperação e reuso em escala industrial, na separação dos componentes da célula fotovoltaica;
- Avaliar outros possíveis reagentes que levem menos tempo para a delaminação por solventes;
- Fazer estudos sobre o melhor processo de lixiviação ácida para recuperar os metais minoritários, sem gerar mais resíduos perigosos para o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, ABNT NBR 10004:2004, p. 71, 2004.

ALEIXANDRE-TUDÓ, J. L.; CASTELLÓ-COGOLLOS, L.; ALEIXANDRE, J. L.; ALEIXANDRE-BENAVENT, R.; Renewable energies: Worldwide trends in research, funding and international collaboration, **Renewable Energy**, v. 139, p. 268-278, 2019.

ASSUNÇÃO, H. D., **Degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalado no DEE-UFC**. (Monografia), Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2014.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par3\\_cap9.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf). Acesso em: 15 de jan. 2020.

BADIEE, A.; ASHCROFT, I. A.; WILDMAN, R. D. The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 212–218, 2016.

BANG, Y.-Y; HONG, N.-J; SUNG LEE, D; LIM, S.-R. Comparative assessment of solar photovoltaic panels based on metal-derived hazardous waste, resource depletion, and toxicity potentials. **International Journal of Green Energy**, v. 15, n. 10, p. 550–557, 2018.

BEZERRA, F. D.; Energia Solar, **Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE**, ano 6, nº 174, 2021.

BRASIL. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm) Acesso em: 06 de jan. 2021.

BOGACKA, M.; PIKOŃ, K.; LANDRAT, M. Environmental impact of PV cell waste scenario. **Waste Management**, v. 70, p. 198–203, 2017.

BRS. **BrS Energia - Eletricidade Solar ao Seu Alcance**. Disponível em: <https://brsenergia.com.br/blog/68>>. Acesso em: 24 nov. 2020.

BURROWS, K.; FTHENAKIS, V.; Glass needs for a growing photovoltaics industry, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, p. 455–459, 2015.

CARVALHO, I. A. S. **Estabilização contra fotodegradação do co-polímero EVA por adição de nanopartículas de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/quartzo irradiado com raios gama para uso fotovoltaico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT) UFOP – CETEC – UEMG. 2011.

CHAIBI, Y. et al. Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models. **Solar Energy**, v. 188, n. May, p. 1102–1110, 2019.

CHEN, W. S., CHEN Y. J., YUEH, K. C., CHENG, C. P., CHANG, T. C., Recovery of valuable metal from photovoltaic solar cells through extraction. **Journal of Physics: Conference series**, 2019.

CHOWDHURY, M. S.; RAHMAN, K. S.; CHOWDHURY, T.; NUTHAMMACHOT, N.; TECHATO, K.; AKHTARUZZAMAN M.; TIONG, S. K.; SOPIAN, K.; AMIN, N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling, **Energy Strategy Reviews**, v. 27, 2020.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESESB, 2008.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. **Radiação Solar**. Rio de Janeiro, 2008.

COUDERC, R. et al. Encapsulant for glass-glass PV modules for minimum optical losses: Gas or EVA? **Energy Procedia**, v. 124, p. 470–477, 2017.

CYRS, W. D.; AVENS, H. J.; CAPSHAW, Z. A.; KINGSBURY, R. A.; SAHMEL, J.; TVERMOES, B. E., Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin-film photovoltaic (PV) panels. **Energy Policy**, v. 68, n. May, p. 524–533, 2014.

DENG, R.; CHANG, N. L.; OUYANG Z.; CHONG, C. M. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, n. April, p. 532–550, 2019.

DIAS, P. R.; BENEVIT, M. G.; VEIT, H. M. Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 3, p. 235–45, 2016.

ECORI, **Energia Solar ao Alcance de Todos**, 2017. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---monocristalino-ou-policristalino---qual-a-melhor-dessas-duas-tecnologias-para-o-brasil>. Acesso em: 26 jan. 2020.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Demanda de Energia – 2050. **Série: Estudos da demanda de energia**. Nota técnica DEA 13/15. p. 257. 2016.

FIORIN, D. V.; MARTINS, F. R.; SCHUCH, N. J.; PEREIRA, E. B. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 33. n.1. 1309. 2011.

FISCHER, M.; WOODHOUSE, M.; HERRITSCH S.; TRUBE, J., International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), **Technical Report**, 2021.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C.; ALSEMA, E. Emissions from Photovoltaic Life Cycles Emissions from Photovoltaic Life Cycles. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 6, p. 2168–2174, 2008.

GALDINO, Marco A. E.; LIMA, Jorge H. G.; RIBEIRO, Cláudio M.; SERRA, Eduardo T. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. Revista da Direng. Rio de Janeiro, Brasil, p. 17-25, 2000.

GRUNOW, P. et al. Hot spot risk analysis on silicon cell modules. **Energy And Automation**, n. September, p. 6–10, 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOMEZ, J.M.R; CARLESSO, F.; VIEIRA, L.E.; SILVA L.; A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol.40 no.3 São Paulo, Epub mar. 26, 2018.

GUERRA, et al. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, 2014.

GU, W.; MA T.; AHMED, S.; ZHANG, Y.; PENG, J. A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology, *Energy Conversion and Management*, 2020.

HIRSCHL, C.; BIEBL-RYDLO, M.; DEBIASIO, M.; MUHLEISEN, W.; NEUMAIER, L.; SSSHERF, W.; ORESKI, G.; EDER, G.; CHERNEV, B.; SCHWAB, W.; KRAFT, M. Determining the degree of crosslinking of ethylene vinyl acetate photovoltaic module encapsulants - A comparative study. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 116, p. 203–218, 2013.

HARA, K.; JONAI, S.; MASUDA, A. Potential-induced degradation in photovoltaic modules based on n-type single crystalline Si solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 140, p. 361–365, 2015.

IEA. International Energy Agency. Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010. **Photovoltaic Power Systems Programme**. Report IEA-PVPS T1-20: 2010, Suíça, 2010.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2011**, OECD/IEA, Paris, 2011.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2018/ Energy Efficiency 2018**, IEA, Paris, 2018.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2020**, IEA, Paris, 2020.

IRENA – International Renewable Energy Agency; **IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme**. End of life management: solar photovoltaics panels. Relatório IRENA e IEA–PVPS, 2016.

ITRPV, **International Technology Roadmap for Photovoltaic 2016**. Disponível em: [www.itrpv.net/Reports/Downloads/](http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/) Acesso em: 13 jan. 2020.

JANNUZZI, G. M.; Power sector reforms in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. **Energy Policy**, 33; 1753-1762. Campinas/SP. 2005.

JENTSCH, A.; EICHHORN, K. J.; VOIT, B.; Influence of typical stabilizers on the aging behavior of EVA foils for photovoltaic applications during artificial UV-weathering. **Polymer Testing**, 44; 242–247, 2015.

KIM, J.; RIVERA, J. L.; MENG, T. Y.; LARATTE, B.; CHEN, S. Review of life cycle assessment of nanomaterials in photovoltaics. **Solar Energy**, v.133, p. 249 -258, 2016.

KLEPA, R. B.; PRAZERES, K. C.; SILVA, T. A.; SANTANA, J. C. C. Comparação entre os módulos de células fotovoltaicas classificados pelas normas brasileiras. **ENEGEP**, Rio de Janeiro/RJ, 2016.

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

LIMA, A. A.; MENEZES, N. P.; SANTOS, S.; AMORIM, B.; THOMAZI, F.; ZANELLA, F.; HEILMANN, A.; BURKARTER, E.; DARTORA, C. A.; Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

LIN, C. H.; HSU, S. P.; HSU, W. C. Silicon Solar Cells: Structural Properties of Ag-Contacts/Si-Substrate. In: Kosyachenko, L. A. **Solar Cells – Silicon Wafer-Based Technologies**. Ed. InTech, pp. 93–110, 2011.

LUNARDI, M. M.; ALVAREZ-GAITAN, J. P.; BILBAO, J. I.; CORKISH, R., A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. **Solar Panels and Photovoltaic Materials**, 2018.

LYU, Y.; KIM, J. H.; GU, X. Developing methodology for service life prediction of PV materials: Quantitative effects of light intensity and wavelength on discoloration of a glass/EVA/PPE laminate. **Solar Energy**, v. 174, n. May, p. 515–526, 2018.

MALANDRINO, O.; SICA, D.; TESTA, M.; SUPINO, S. Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy. **Sustainability**, v. 9, n. 4, 2017.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S.; Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MASUDA, A.; HARA, Y. Potential-induced degradation of thin-film Si photovoltaic modules. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 56, n. 4, 2017.

MARUTHI PRASAD, R.; KRISHNAMOORTHY, A. Design, construction, testing and performance of split power solar source using mirror photovoltaic glass for electric vehicles. **Energy**, v. 145, p. 374–387, 2018.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; ALAVI, Z.; ISLAM, M. T.; BEHNIA, M. End-of life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review, **Resources - Conservation and Recycling**, v. 146, p. 1–16, 2019.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. S.; SILVA, T. C., Gestão do Fim de Vida de Módulos Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 364–383, 2019.

MUNOZ, M. A. et al. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2264–2274, 2011.

NASCIMENTO, R. S. DO; ALVES, G. M. **Fontes Alternativas E Renováveis De Energia No Brasil: Métodos E Benefícios Ambientais**. Revista Univap, v. 22, n. 40, p. 274, 2017.

OLIVEIRA, M. C. C. DE et al. The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A

review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. March, p. 2299–2317, 2018a.

OLIVEIRA, A. S. **Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2017.

OLIVEIRA, D., **Destinação final das placas fotovoltaicas pós consumo no Brasil**. (Trabalho de formatura em Engenharia de Hidráulica e Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2017.

OLIVEIRA, M. C. C. DE et al. The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. March, p. 2299–2317, 2018b.

PAIVA, M. L.; **Avaliação da aplicabilidade de um sistema fotovoltaico 2018 conectado à rede em uma granja de aves no estado do Mato Grosso e seus impactos ambientais**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

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

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. ; KOTHARI, S., Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 1513-1524, 2011.

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

PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos, São Paulo, 2006.

PEREIRA, L. M. N., **Produção e caracterização de silício policristalino e sua aplicação a TFTS**, Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais, especialidade Microelectrónica e Optoelectrónica) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa/Portugal, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro/RJ, 2014.

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

PV Cycle. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/>. Acesso em: 26 jan. 2020.

REN21. **Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial**. Ren21, p. 31, 2016.

REN21. **Renewables 2012 Global Status Report**. Ren21, Secretariat. 2017.

SANTANA, R. J., **Desenvolvimento de filme fino de a-Si:H por pulverização catódica para aplicações fotovoltaicas**, Dissertação (Mestrado em Rede Temática em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/Minas Gerais, 2011.

SICA, D.; MALANDRINO, O.; SUPINO, S.; TESTA, M.; LUCCHETTI, M. C., Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3, p. 2934–2945, 2018.

SCHLOTHAUER, S.; JUNGWIRTH, S.; KOHL, M.; RODER, B., Degradation of the encapsulant polymer in outdoor weathered photovoltaic modules: Spatially resolved inspection of EVA ageing by fluorescence and correlation to electroluminescence, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 102, p. 75–85, 2012.

SCHMITZ, A.; KAMINSKI, J.; SCALET, M. B.; SORIA, A. Energy consumption 242 and CO<sub>2</sub> emissions of the European glass industry, *Energy Policy* p. 142–155, 2011.

SWERA. Disponível em: [https://openei.org/wiki/Solar\\_and\\_Wind\\_Energy\\_Resource\\_Assessment\\_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA)). Acesso em: 26 jan. 2020.

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

TESLA STORE. **Célula Fotovoltaica: Entenda seu princípio e funcionamento**, 2018. Disponível em: <https://www.teslastore.com.br/blog/celula-fotovoltaica-entenda-seu-principio-e-funcionamento/>. Acesso em: 10 jan. 2020.

TIMILSINA, G. R.; KURDGELASHVILI, L; NARBEL, P. A. Solar energy: Markets, economics and policies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 449–465, 2012.

TOMADON, B. S.; OLIVEIRA, M.M.; VAZ, N. A.; VAZ, T. A.; BELINE, E. L.; Energia solar: panorama atual, **EEPA – Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**, Campo Mourão/Paraná, 2019.

TOLMASQUIM, M. T., Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. EPE – Rio de Janeiro, 2016.

VAQUEIRO-CONTRERAS, M. et al. Identification of the mechanism responsible for the boron oxygen light induced degradation in silicon photovoltaic cells. **Journal of Applied Physics**, v. 125, n. 18, 2019.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C.; Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Revista Química Nova**. Vol. 32, N. 3, São Paulo, 2009.

WANDERLEY, A. C. F. CAMPOS, A. L. P. S. Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte. **Revista Holos**. Ano 29, Vol. 3. Natal: IFRN, 2013.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, v. 75, p. 450–458, 2018.

YI, Y. K.; KIM, H. S.; TRAN, T.; HONG, S. K.; KIM, M. J. Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64, n. 7 p. 797-807, 2016