



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS  
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO VICTOR FELIX CABRAL DA SILVA

## **RESÍDUOS DE PLACAS SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

ANGICOS-RN

2021

JOÃO VICTOR FELIX CABRAL DA SILVA

**RESÍDUOS DE PLACAS SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal  
Rural do Semi-Árido como requisito para a  
obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar  
em Ciência e Tecnologia

Orientadora: Profa, Dra. Gislene Micarla  
Borges de Lima

ANGICOS-RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F586r Félix Cabral da Silva, João Victor .  
Resíduos de placas solares: uma revisão  
bibliográfica / João Victor Félix Cabral da  
Silva. - 2021.  
50 f. : il.

Orientadora: Gislene Micarla Borges de Lima .  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2021.

1. Energia solar . 2. Painéis fotovoltaicos .  
3. Resíduos . I. Borges de Lima , Gislene Micarla,  
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos  
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte  
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO VICTOR FELIX CABRAL DA SILVA

## RESÍDUOS DE PLACAS SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Monografia apresentada à Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como  
requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Interdisciplinar em Ciência e  
Tecnologia

Defendida em: 19/11/2021

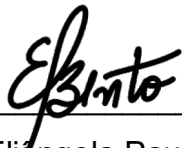
### BANCA EXAMINADORA

GISLENE MICARLA BORGES  
DE LIMA:05191228448

Assinado de forma digital por GISLENE  
MICARLA BORGES DE  
LIMA:05191228448  
Dados: 2021.11.27 16:15:51 -03'00'

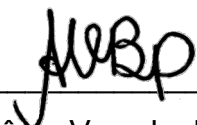
Prof<sup>ª</sup>. Dra. Gislene Micarla Borges de Lima (UFERSA)

Presidente



Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eliângela Paulino Bento (UFPB)

Membro examinador



Prof<sup>ª</sup>. Dra. Antônia Veruska Benevides Pinheiro

Membro examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela oportunidade de ter chegado até aqui e ter me fornecido ajuda para continuar e enfrentar as dificuldades. A meus pais Francisca Daschagas Alves Félix Cabral e Erinaldo Cabral da Silva por todo o apoio incondicional dado a mim, que nunca deixaram de me acompanhar e dar apoio em todas as etapas de minha vida.

Aos meus amigos de universidade, e de infância que desde o começo sempre estiveram ao Meu lado, nessa caminhada de aprendizado.

A minha orientadora Gislene Borges, por ter aceitado participar desse desafio junto a mim, e pelos conhecimentos repassados ao longo dessa jornada.

## **RESUMO**

Com o aumento das tecnologias, e os altos índices de emissão de combustíveis que são liberados na atmosfera, prejudicando a fauna e flora, cresce indubitavelmente a busca por fontes de energias limpas, que é o caso da energia solar. Contudo, surge um incessante questionamento sobre as placas solares: o que fazer com elas após seu uso? Isso decorre pelo fato das placas terem uma vida útil, com estimativa entre 20 a 25 anos, e em sua composição existirem muitos materiais nocivos, que se descartados inadequadamente no meio ambiente, ou em locais inapropriados, podem prejudicar consideravelmente o meio ambiente, como por exemplo o telureto de cádmio (CdTe), cobre (Cu), dentre outros materiais. Neste trabalho busca-se fornecer uma revisão bibliográfica sobre a destinação adequada dos resíduos provenientes de placas solares, para tanto,

Serão apresentados os métodos/tecnologias de tratamento, como também a legislação que Regulamenta a destinação final correta para estes materiais.

**Palavras-chave: energia solar, painéis fotovoltaicos, resíduos.**

## **ABSTRACT**

With the increase of technologies, and the high rates of fuel emission that are released into the atmosphere, harming the fauna and flora, the search for clean energy sources, which is the case of solar energy, undoubtedly grows. However, an incessant question arises about solar panels: what to do with these after their use? This is due to the fact that they all have a useful life, with an estimated range of 20 to 25 years, and in their composition there are many harmful materials, which if improperly disposed of in the environment, or in inappropriate places, can considerably harm the environment, such as for example, cadmium telluride (CdTe), copper (Cu), among other materials. This work seeks to provide a literature review on the proper disposal of waste from solar panels, therefore, the methods/technologies of treatment will be presented, as well as the legislation that regulates the correct final destination for these materials.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic panels, waste.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Capacidade global instalada até 2018 .....                                                                               | 14 |
| Figura 2.2 - Gerações de painéis fotovoltaicos                                                                                      | 15 |
| Figura 2.3- Segunda geração de painéis fotovoltaicos                                                                                | 15 |
| Figura 2.4 - Módulos de filmes finos                                                                                                | 16 |
| Figura 2.5 - Módulo solar de terceira geração                                                                                       | 17 |
| Figura 2.6 - Componentes das camadas de um módulo de silício cristalino                                                             | 18 |
| Figura 7 - As etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos                                                                     | 20 |
| Figura 8 – Capacidade global instalada até 2018                                                                                     | 25 |
| Figura 9 - Resultados cumulativos de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050                                                     | 26 |
| Figura 10 - Curva massa x resíduo                                                                                                   | 27 |
| Figura 11 - Resultado modelados dos volumes acumulados estimados de resíduos de painéis fotovoltaicos no final de vida por país (t) | 28 |
| Figura 12 – Expansão indicativa de referência PDE 2019                                                                              | 29 |
| Figura 13 – Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino                                      | 33 |
| Figura 14 – Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe                                                       | 34 |
| Figura 15 – A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV                              | 35 |
| Figura 16 - Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030                                                                         | 37 |
| Figura 17 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030             | 37 |
| Figura 18 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050             | 39 |



## SUMÁRIO

|            |                                                                       |           |            |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|------------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                               | <b>9</b>  | <b>2</b>   |
|            | <b>PLACAS SOLARES.....</b>                                            | <b>10</b> |            |
| <b>2.1</b> | <b>Contexto histórico .....</b>                                       | <b>11</b> | <b>2.2</b> |
|            | <b>Tipos de painéis .....</b>                                         | <b>15</b> |            |
| 2.2.1      | Primeira geração .....                                                | 15        |            |
| 2.2.1      | Segunda geração .....                                                 | 16        |            |
| 2.2.1      | Terceira geração .....                                                | 16        |            |
| <b>2.3</b> | <b>Descartes dos painéis fotovoltaicos .....</b>                      | <b>19</b> |            |
| 2.3.1      | Impactos ambientais .....                                             | 21        |            |
| 2.3.2      | Políticas Nacional de Resíduos Sólidos .....                          | 23        |            |
| <b>2.4</b> | <b>Matriz energética e estimativa para produção de resíduos .....</b> | <b>24</b> |            |
| 2.4.1      | Cenário global .....                                                  | 25        |            |
| 2.4.1      | Cenário brasileiro .....                                              | 29        |            |
| 2.4.1      | Cenário norte riograndense .....                                      | 31        |            |
| <b>3</b>   | <b>TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM.....</b>                                 | <b>33</b> |            |
| <b>3.1</b> | <b>Benefícios da reciclagem .....</b>                                 | <b>41</b> |            |
| <b>4.</b>  | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                     | <b>42</b> |            |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                              | <b>43</b> |            |

## ABREVIATURAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência nacional de energia elétrica

Au – Ouro

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

C-Si – Silício Cristalino

CdTe – Telureto de Cádmio

CIGS – Seleneto, Índio, Gálio e Cobre

GW – Gigawatt

IEA – Internacional Energy Agency

IRENA – Agência Internacional para as Energias Renováveis

MW – Megawatt

PGRS – Plano de Gestão de Resíduos Sólidos

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PV – Painéis Fotovoltaicos

Se – Selênio

WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipament

Wp – Watt pico

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, é vivenciado o auge das energias renováveis, e a energia proveniente do sol vem se tornando cada vez mais utilizada no que se refere a produção de energia elétrica. Observa-se que as indústrias de energia fotovoltaica demonstram um enorme salto em desenvolvimento desde a década passada, crescendo em ritmo acelerado, conforme a demanda aumenta, com poucos sinais de desaceleração. Após o ano de 2008, as usinas de energia solar, e construção de módulos fotovoltaicos tiveram um grande salto. Contudo, a energia solar

Permanece com uma pequena porção do suprimento geral da matriz energética mundial.

Com o aumento das tecnologias, e a emissão de gases que são liberados com a queima de combustíveis fósseis, prejudicando a fauna e flora, cresce indubitavelmente a busca por fontes de energias limpas, que é o caso da energia solar, diferente das provenientes de combustíveis fósseis, a qual gera a emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente.

Contudo, surge um incessante questionamento, sobre as placas solares, todas elas têm uma vida útil, com estimativa entre 20 a 25 anos, e em sua composição existem muitos materiais nocivos, que se descartados inadequadamente no meio ambiente, ou em locais inapropriados, esses podem prejudicar consideravelmente o meio ambiente, como por exemplo o Silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre (Cu), dentre outros materiais, que ao fim de sua vida útil, prejudicam o meio ambiente, o que fazer com esses resíduos? Os painéis fotovoltaicos são fontes de energia sem custo de combustível, entretanto com um custo para sua produção, ainda em parâmetros altos, e são fabricados com matérias primas que são limitadas e ambientalmente inseguras (SOLAR, 2020).

No Brasil o cenário é bastante promissor, com planos de expansão de energia, com um crescimento considerável, conforme a demanda. Embora ainda no processo inicial de seu mercado, o Brasil foi um dos dez países que mais instalaram sistemas de energia solar em 2020, mesmo com todas suas reversões da pandemia de Covid-19 sobre o mercado do setor (NASSA, 2021). De forma necessária, no Brasil, existe uma política nacional de resíduos sólidos, a qual assegura que as empresas responsáveis pelo comércio de energia solar em âmbito nacional, sigam normas de regulamentação e paguem taxas, e multas, caso os painéis sejam descartados em locais inapropriados. Outros países como França detém também uma política específica, estando presente neste país, a primeira fábrica especializada para o melhor encaminhamento dos dejetos das placas solares, e recentemente com a

aprovação governamental da construção da maior usina flutuante do país. Neste trabalho será apresentado uma revisão bibliográfica acerca dos painéis solares, começando pelo contexto histórico que conduziu ao cenário atual no que se refere a invenção destes equipamentos, depois pelos tipos de placas, normativas de descarte de resíduos, técnicas de reciclagem, finalizando com os benefícios da produção de energia solar. Além disso, no decorrer desta monografia, serão feitos apontamentos sobre a matriz energética atual no contexto mundial, brasileiro e nordestino

## **2. PLACAS SOLARES**

### **2.1 Contexto histórico**

Esforços para se fazer o uso da energia vinda do sol na civilização humana não faltaram desde a antiguidade, no início das civilizações os seres humanos já construíram diversas “engenhocas” para se aproveitar a energia proveniente do sol. O precursor destas invenções foi o inventor grego Arquimedes com seu dispositivo tecnológico *raio solar da morte* que foi projetado com a finalidade de aproveitar energia solar para o uso humano. O dispositivo criado pode ser mítico e não histórico, porém alguns historiadores, relatam que os gregos colocavam o espelho no alto de um morro, para que o sol que atingisse nele, refletisse nos navios de guerra que chegavam, fazendo com que queimassem suas velas, usando espelhos para concentrar luz do sol, sendo considerado como primeiro exemplo de um sistema óptico adaptativo. Contudo, o entendimento do que seria a luz proveniente do sol, passou por vários anos de discussão científica.

O cientista Isaac Newton (1642-1727) ficou fascinado com a luz e pensava nela como um fluxo de partículas, como bolas de bilhar em miniatura. Em meados do século XIX, Thomas Young, polímata inglês, desenvolveu investigações sobre a natureza da luz de forma paralela ao físico francês Augustin Fresnel, eles realizaram diversos experimentos que demonstraram os efeitos de interferência nos feixes de luz, que incluem as faixas de cores frequentemente vistas na superfície das bolhas de sabão. Com isso, a teoria sugeria que a luz agia como uma onda, semelhante às ondas de um lago - assegurada pelo trabalho do físico e matemático James Clerk Maxwell na década de 1860, onde mostrava que a luz visível faz parte de um espectro maior de radiação eletromagnética.

O físico alemão Max Planck (1858-1947) utilizou da teoria feita por Isaac Newton para assim explicar as características da radiação do corpo negro, e que posteriormente foi usada para a base do trabalho de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico, em 1905, no qual foi reconhecido com o mérito do prêmio Nobel. Em seu trabalho feito, Einstein propôs que a luz fosse composta por pequenas partículas de energia denominadas fótons, o desenvolvimento da teoria foi um dos grandes triunfos intelectuais do século XX. Essas descobertas tiveram fundamental importância para os conhecimentos que se tem hoje em dia, pois nossa visão moderna é que a luz tem uma dualidade essencial, ora pode ser um fluxo de partículas, ora para Um tipo de onda.

A origem o uso do aproveitamento da energia da luz proveniente do sol (energia solar) como fonte de energia elétrica deu-se em meados de 1839, logo após uma pesquisa realizada pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, que fez a descoberta do efeito fotoelétrico, depois houve a criação da primeira célula fotovoltaica em 1883 (PORTAL, 2016) pelo norte-americano Charles Fritts. Em seguida, uma série de acontecimentos que culminaram no prêmio Nobel de Einstein, originou-se a era moderna do aproveitamento da energia solar, em meados de 1954, logo depois do processo de dopagem de silício por Calvin Fuller deu-se início a criação da célula solar que temos nos padrões atuais por Russell Shoemaker Ohl (PORTAL, 2016). Essa célula era formada por

Selênio (Se) e com uma cobertura de ouro (Au), contudo a sua eficiência era de aproximadamente 1%, muito abaixo dos padrões atuais, pois a placa mais eficiente, até o ano de 2017, chegava em torno de 46% de conversão de energia solar em energia elétrica, segundo Pesquisa realizada pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL).

As indústrias estão em constante processo de crescimento desde o início do século, em 2008, as fábricas de energia fotovoltaicas produziram cerca de 170 megawatts em módulos, o bastante para fornecer energia para 250.000 mil residências populares. Ao longo de 10 anos, no final de 2018 as instalações obtiveram um grande salto, superando as projeções, ultrapassando os 500 gigawatts (GW), Traçando um paralelo obteve mil vezes a produção da década anterior, chegando a capacidade de abastecer mais de duzentos milhões de casas (MULVANEY, 2019). Diante deste cenário, é possível observar que a energia solar não é mais uma fonte de energia alternativa. Vales parabólicos e torres de energia solar são as tecnologias elétricas que estão dando

significativas contribuições para o fornecimento de eletricidade para muitos lugares, como por exemplo, Alemanha, Brasil e China.

Atualmente, os especialistas afirmam que o maior período de crescimento de energia solar está no futuro, com base nos índices de crescimento desde meados de 2009 essa perspectiva já está se tornando realidade, entretanto, nem todos os especialistas compartilham dessa mesma visão, ora pelos impactos ambientais causados, ora pelo descarte indevido, de painéis na natureza ou em locais inadequados para a sua finalidade (ECOIA, 2017). Desse modo, surgem os questionamentos sobre essa fonte de energia, pois, do ponto de vista ambiental ela poderá trazer benefícios e impactos importantes, tanto no meio ambiente quanto na sociedade. Dentre os benefícios, estão os incontáveis danos mitigados ao fazer comparação com outras fontes, sobretudo a energia que é oriunda dos combustíveis fósseis, pois não há o uso de queima de combustíveis durante o processo, fazendo assim que se sobressaia na qualidade de vida e muito menos na poluição do ar, pois para a geração de energia a partir de combustíveis fósseis, causa a emissão de gases causadores do efeito estufa, como por exemplo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Responsável por cerca de 60% do efeito estufa (PROCLIMA).

## **2.2 Tipos de Painéis**

A princípio, quando se pensa em painéis solares (PVs), logo surge a ideia de um produto que seja eficiente e sustentável. Indubitavelmente os PVs são uma saída, atrelado a energia eólica, para a geração de energia renovável, mas a sua reciclagem é bastante complexa. Devido a esta desvantagem, os painéis não deixam de serem viáveis para usinas solares e adotados em construções, contudo, surge o questionamento pelo seu ciclo sustentável não ser totalmente completo, e colocá-lo em foco, pelo fato do seu descarte ao fim de sua vida útil. Em sua composição a placa fotovoltaica contém células solares que incluem metais nocivos, como por exemplo o chumbo, e o cádmio, tornando o seu descarte em aterros ou locais inadequados, muito perigoso.

Atualmente, existem três tipos de painéis no mercado, ilustrados na Figura 1, tendo como um dos componentes mais importantes em sua construção o silício, que é o segundo elemento mais comum na crosta terrestre, o silício pode ser usado em 3 métodos principais em painéis solares. Os painéis monocristalinos são os mais eficientes em atividade, e, por conseguinte, os mais caros. Em

seu processo de construção os fabricantes cortam bolachas individuais a partir de um bloco grande feito de silício, logo depois fixam nos painéis, a

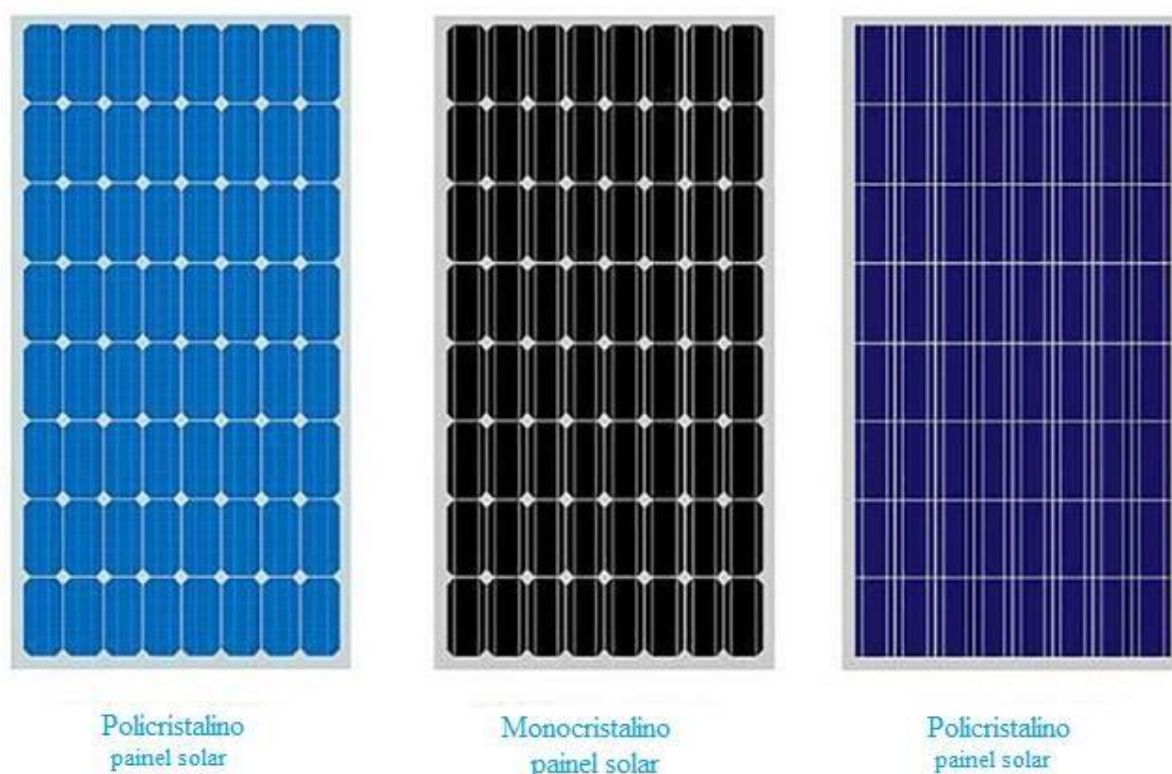
A realização deste processo citado, assegura mais qualidade e eficiência nos painéis (VIVO 2020).

Para a construção das células solares policristalinas, o processo é diferente, pois são fabricadas com a fundição de bastante cristais de silício, que são colocados em massa sobre o painel. Sendo constituída da cor azul, e diferentemente dos monocristalinos, são mais baratos e possuem menos eficiência e por último na reciclagem de seus módulos, ressaltando que o silício pode ser reciclado.

Células de silício amorfo, são menos eficientes, em contraproposta, são mais finas e flexíveis, sendo possível serem fixadas em diferentes materiais, como por exemplo, plástico ou vidro. Os modelos de painéis que estão em atividade no mercado atual, perdem cerca de 6% a 10% de sua eficiência, depois de 10 anos de uso, depois de 25 anos, sua eficiência já está em torno de aproximadamente 20%. Os painéis de alta qualidade podem gerar energia com percentuais aceitáveis de eficiência por um período de 30 a 40 anos de uso, por outro lado, com

Sua qualidade comprometida depois do tempo estabelecido (VIVO, 2020).

Figura 1.1 - Os três tipos de painéis solares: Azul - feito de policristalino, Preto - feito de monocristalino e o roxo - composto por células de silício amorfo.

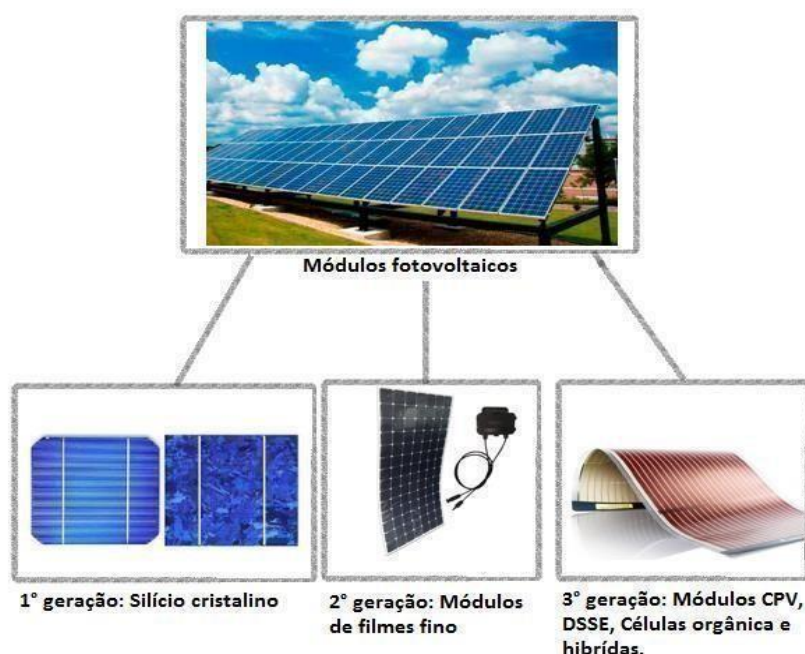


Fonte adaptada de: (VIVO, 2020)

As células fotovoltaicas são feitas de materiais que são semicondutores que apresentam um conjunto de módulos responsáveis por realizar a transformação da luz solar, em energia elétrica, onde o elétron salta para a banda de condução quando tem energia suficiente fornecida pelo sol, nesse instante que a energia elétrica é gerada pelos condutores dos módulos. (FRAIDENRAICH, 2012).

Existem três tecnologias que são aplicadas para a produção de módulos fotovoltaicos, classificados em três gerações, de acordo com seu material e as suas características. A classificação se dá pela seguinte forma, por geração e divide os módulos em três grupos de primeira, segunda e terceira geração (WUETAL, 2005), como é possível ver na Figura 2.

Figura 2.2 - Gerações de painéis fotovoltaicos.



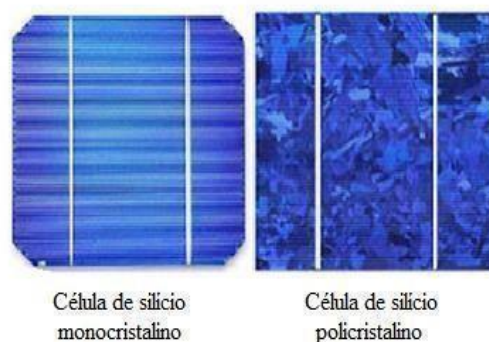
Fonte: SOLAR, 2018

### 2.2.1 Módulos de silício cristalino – primeira geração

A primeira geração é formada pelo silício cristalino, e que pode ser dividido em silício monocristalino e silício policristalino. O silício monocristalino, como já dito anteriormente, é bem mais eficiente, porém mais caro, justamente pelo fatiamento de um único cristal (SANTOS, 2013). A sua rede é quase cristalina e é quase toda homogênea apresentando assim poucas imperfeições em sua composição (CRESESB, 2010). Os módulos fotovoltaicos feitos de silício policristalino, apresentam a sua eficiência inferior, em comparação com o monocristalino, porque o policristalino é fundido e solidificado, resultando em um concentrado com maiores imperfeições.



Figura 2.3 - Segunda geração de painéis fotovoltaicos.



Fonte: (Adaptado de ANDREOTTI, 2018).

### 2.2.2 Módulos de filme fino – segunda geração

A segunda geração é feita de materiais diversos, como por exemplo o silício amorfo, disseleneto de cobre, índio, gálio, e telureto de cádmio, além de possuir uma ou até mesmo várias camadas de materiais fotovoltaicos por cima do substrato, assim como o vidro, plástico e ácido inoxidável. O custo baixo desses filmes é uma grande vantagem, para se levar em consideração, pelo fato de consumir menos matéria prima e menores índices de energia durante a sua fabricação, o seu processo de fabricação também é mais prático, pois pode ser produzido em larga escala (VILLALVA, 2012). Entretanto, os seus níveis de eficiência são bem menores, em comparação às células de cristais único de silício (GORE, 2010). Na figura 4, tem-se a apresentação do modelo de um módulo de filme fino que é um dos materiais que compõem os módulos da segunda geração de painéis.

Figura 2.4 - Módulos de filmes finos.

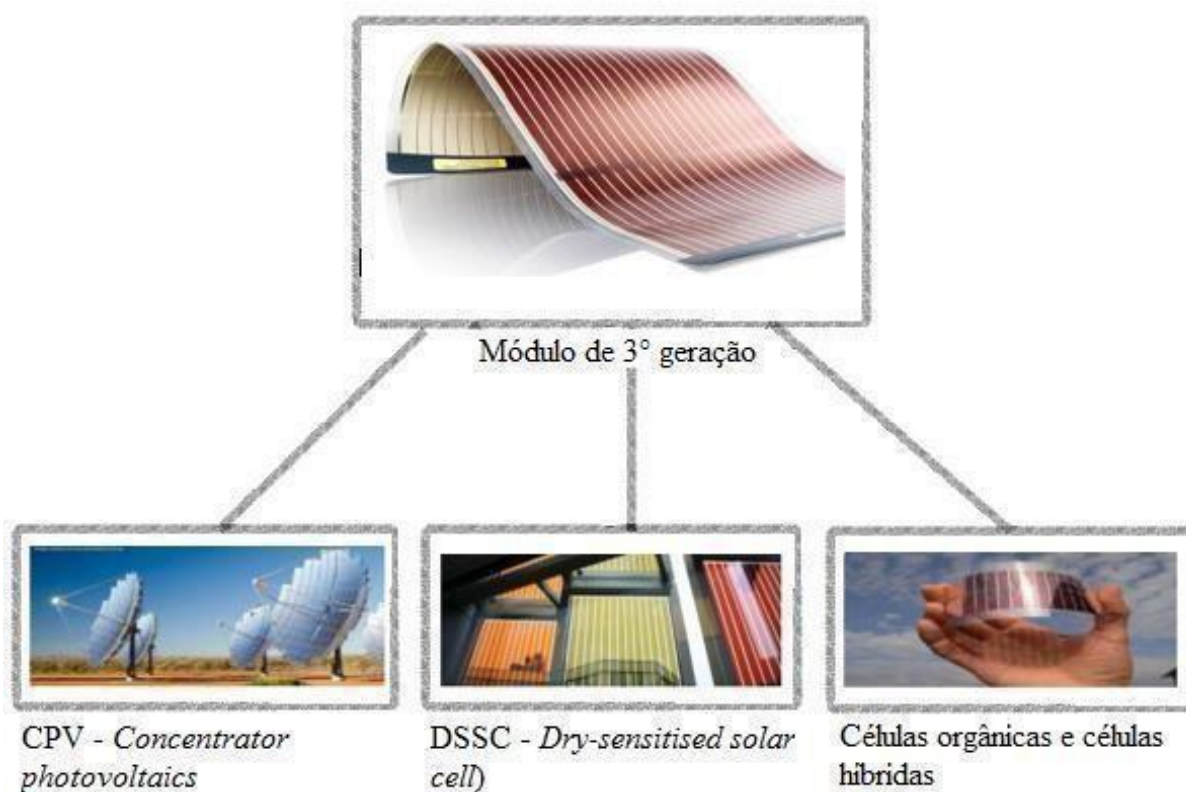


Fonte: (Adaptado de SOLAR, 2018).

### 2.2.3 Módulos CPV, DSSC, células orgânicas e híbridas – terceira geração

Os módulos que constituem a terceira geração são os módulos de CPV sigla em inglês que significa concentradores fotovoltaicos, os módulos *Dry-sensitised solar cell* (DSSC), e as células orgânicas. Esses módulos têm uma maior eficiência de luz solar, por causa de sua utilização, o que torna altamente eficiente, com um custo mais baixo e utilização de um número superior de materiais sendo esses de baixos índices de toxicidades (VÉRONIQUE, 2011). Os módulos de CPV utilizam lentes para focar a luz do sol e utilizam células de silício ou compostos como compostos do grupo III-V, que são materiais do grupo dos semicondutores, como Arsenieto de gálio (GaAs). Os DSSC são os módulos sensibilizados por corantes em sua composição, e são compostos por materiais orgânicos e inorgânicos como Dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>). As células orgânicas, geralmente compostas por materiais polímeros ou de pequenas moléculas orgânicas, por fim as células que são híbridas, estas combinam o silício cristalino com o silício amorfo (GHIZONI, 2005). A figura 5 mostra os painéis fotovoltaicos dos módulos de 3 geração e a sua divisão em CPV, DSSC, e células orgânicas e híbridas.

Figura 2.5 - Módulo solar de terceira geração.



Fonte: (SOLAR, 2016).

### Componentes do módulo de silício cristalino

Por ser o semicondutor que é mais empregado hoje em dia, será descrito a seguir a composição das diversas camadas que possui um módulo fotovoltaico de silício cristalino, como pode-se observar na Figura 6.

Figura 2.6 - Componentes das camadas de um módulo de silício cristalino.



Fonte adaptada de: (SOLAR, 2016).

O módulo fotovoltaico tem sua camada superior envolvida por um vidro especial, temperado, que tem como objetivo uma menor reflexão e que seja possível deixar passar o máximo de luz através dele. Em seguida vem o material de encapsulamento, que é conhecido como *Ethylene Vinyl Acetat* (EVA) este vai proteger o módulo contra as adversidades causadas pela alta temperatura, garantindo o máximo de aplicação solar nos módulos Fotovoltaicos (SOLAR, 2016).

Há diferentes contatos metálicos e interações metálicas para que possa ocorrer a corrente elétrica. Esses contatos são de importância na reciclagem dos módulos, pois eles podem conter metais que sejam preciosos e recicláveis, além de ser reutilizável, em decorrência disso, causando economia de energia, redução dos impactos ambientais, e cortes de gastos (DIAS, 2015). Entre duas camadas de material encapsulante, junto com os contatos metálicos, é colocada a célula voltaica, que, então, vai fazer a conversão da luz solar em energia elétrica (BROUWER, 2011). O *backsheet*, que fica situado na parte de trás da célula, é responsável por proteger os componentes internos do módulo, agindo como um isolante elétrico (SOLAR, 2016). Para que módulo seja leve e tenha uma boa resistência, com o término de todo o processo da fabricação do mesmo, deve-se colar ao seu redor, um molde de alumínio, que justamente irá estruturar o painel, a selagem entre o vidro e a moldura é feita por seletores de silicone ou polibutil (JOHN, 2008).

### **2.3 Descarte dos painéis fotovoltaicos**

Os módulos fotovoltaicos quando são descartados, se encaixam como resíduos REEE – Resíduos de equipamentos Eletroeletrônicos. Os materiais desta categoria, contém um potencial alto para contaminar o solo, provocando um problema ambiental devido à liberação de algumas substâncias tóxicas. Em decorrência disso, deve ser separado dos resíduos sólidos comuns, e o seu descarte realizado de maneira adequada e de forma especial (BETTANIN, 2017). A parte mais trabalhosa e com maior custo no processo de reciclagem de painéis solares é a separação correta de todos os seus elementos, para isso seria necessário submeter os painéis de silício a um aquecimento de 500°C, para fazer a separação do silício dos metais pesado, uma vez separadas as

partes que são de silício podem ser fundidas e tem uma taxa de reaproveitamento de até 85%. (CICLO, 2020).

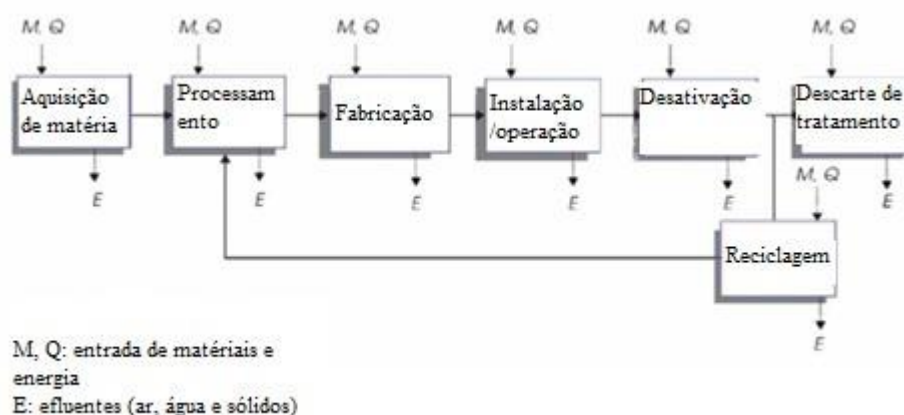
Os painéis constituídos por películas finas podem ser triturados, no processo para que suas partes líquidas e sólidas sejam separadas, no processo de reaproveitamento de seus materiais. Logo em seguida a este processo, cerca de 90% do vidro pode ser reciclado, com aproveitamento de 95% do material semicondutor, reaproveitado (CICLO, 2020). Para que a taxa de reciclagem dos painéis solares aumente, e atinja níveis satisfatórios, seria necessária uma regulamentação mais criteriosa do setor. Alguns especialistas no assunto, recomendam que seja cobrada uma taxa, sobre os painéis que estejam entrando no mercado agora, para que se crie um fundo destinado, com intuito de financiar a reciclagem dos resíduos desta indústria (CICLO, 2020). Ao fazer o descarte dos painéis, é preciso entrar em contato com a empresa fabricante, para que então a mesma forneça todas as informações, e orientações adequadas para a sua melhor destinação. O descarte dos painéis, deve ser feito de maneira correta, e gerenciado da mesma forma, pois feito de maneira inadequada e sem o tratamento específico, pode causar impactos negativos ao ambiente, e também a saúde humana. Os impactos estão relacionados com a lixiviação de materiais tóxicos, que é o processo de extração ou solubilização dos componentes de uma rocha, mineral ou solo, ou até mesmo de depósitos sedimentares, alguns destes materiais tóxicos como por exemplo o chumbo e o cádmio, e com a perda de alguns materiais preciosos, como a prata, índio, gálio, germânio e ainda materiais convencionais, como vidro e alumínio (VÉRONIQUE, 2011). Segundo a norma NBR10004, os módulos fotovoltaicos foram considerados como resíduos sólidos perigosos, da classe 1. Em decorrência disso, se não houver um procedimento de reciclagem para os módulos, após o seu descarte, estes devem ser descartados junto aos restos industriais perigosos, evitando o descarte junto com resíduos sólidos comuns. Atrelado a isso, surge a importância em conhecer as técnicas de reciclagem para esses dispositivos após o fim de sua vida útil (BETTANIN, 2017). De acordo com Cyr et al (2014):

"O descarte de módulos fotovoltaicos ainda não representa um risco iminente à saúde no seu volume de produção anual, porém é preciso um controle, que será vital para gerenciar o fim de vida dos módulos".

### 2.3.1 Impactos ambientais

No trabalho desenvolvido por Fthenakis e Lyra (2018) é feita uma abordagem consistente sobre os impactos ambientais causados durante o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos. Questões ambientais preocupantes, surgem durante a vida útil de um sistema fotovoltaico, que se origina desde a extração e purificação das matérias primas; prossegue com a fabricação, instalação e muitos anos de operação; e finaliza com a reciclagem ou descarte de resíduos. Desse modo, é importante avaliar todo o ciclo de vida dos painéis para assim, conhecer os impactos sócio ambientais que são causados pelo uso intensivo de energia fotovoltaica. Para estimar os impactos ambientais causados pelo fluxo de material e energia em cada processo do estágio do “ciclo de vida” de um painel fotovoltaico é importante definir todos os ciclos, desde a extração de sua matéria-prima, até o final de sua vida útil. O ciclo normalmente se inicia com a mineração dos materiais no solo, e continua com o processo e a purificação dos materiais até a fabricação dos compostos e produtos químicos utilizados no processamento e fabricação, transporte, instalação, uso, manutenção e uma distante eventual desativação e descarte e/ou reciclagem no ciclo final de vida de um painel. Na medida em que os materiais são reciclados no final de sua vida em novos produtos a estrutura é prolongada de “berço a berço”. Este ciclo de vida para painéis fotovoltaicos é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - As etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos



Fonte adaptada de: (FTHENAKIS e LYRA, 2018)

Como observado na Figura 7, todas as etapas de um painel solar, no seu ciclo de vida, começando com a aquisição da matéria prima, depois material processado, em seguida a fabricação, onde temos a constituição do modelo do painel, após a instalação e operação do módulo, e o

descomissionamento, uma parte importante, pois é nessa onde tomamos as providências necessárias para a desativação no final de sua vida útil, e chegando na parte do tratamento de descarte, e então temos a reciclagem, levando o módulo a constituir de um ciclo sustentável de vida útil.

A fabricação de módulos fotovoltaicos requer um uso de muita energia e materiais –água, metais, plásticos, vidro e outros componentes - que produzem impactos sócio-ambientais. Mesmo que esses impactos ainda sejam menores, o crescimento da energia fotovoltaica para os níveis terawatts trará impactos significativamente nas emissões de gases do efeito estufa e exigirá novas Considerações sobre materiais e o uso do solo (FTHENAKIS, 2018). Desse modo, surge a possibilidade de quanto mais cedo os impactos poderem ser identificados, avaliados e planejados, haverá uma maior chance de se reduzirem as consequências. Parte dos painéis que utilizam filmes finos contêm compostos de cádmio, que são metais pesados que apresentam riscos ao meio ambiente de saúde e de segurança com excessivos níveis de exposição. Sabe-se que a exposição aguda a formas elementares e solúveis de compostos elementares de cádmio causa doença renal, enfraquecimento ósseo, defeitos congênitos, infertilidade, insuficiência renal, inflamação pulmonar grave e fibrose pulmonar. O cádmio é um conhecido agente cancerígeno, mutagênico (causador de mutação) e genotóxico (prejudicial a informação genética). O caso epidemiológico mais citado de exposição ao cádmio é oriundo do Japão em meados do século XX, onde a doença de *itai-itai* causou graves danos ósseos, em decorrência de uma mina de zinco cuja a poluição por cádmio havia se instalado no arroz, consumido pela população da comunidade (MULVANEY, 2019). Por vários anos, sendo usado como pigmentos e como anticorrosivo, o cádmio atualmente não é mais usado em muitos produtos, especificamente naqueles que eventualmente poderiam expô-lo no ambiente, tais como, tinta. Seu uso em filmes finos fotovoltaicos é uma das poucas áreas em que a demanda por compostos de cádmio está crescendo.

Os maiores riscos à saúde humana em decorrência dos compostos de cádmio no ciclo de vida dos produtos fotovoltaicos Cd-Te ocorrem nos locais das atividades de mineração fundição e gerenciamento do fim da vida. O Cd-Te pode ser um material mais seguro de manusear do que os demais compostos de cádmio; é um composto que não ocorre nos minérios da crosta terrestre. Independente da segurança do Cd-Te, a exposição a compostos de cádmio pode acontecer mais profundamente na cadeia de abastecimento de minas e fundições, que em muitos casos foram

associadas ao grupo de câncer (MULVANEY, 2019). O cádmio é produzido a partir de resíduos De zinco e da fundição do chumbo com o mesmo. O cádmio e o telúrio são geralmente Encontrados em menores quantidades nos minérios de outros metais, tais como, cobre, zinco e chumbo.

Em suma, a fabricação de módulos fotovoltaicos utiliza alguns materiais perigosos que podem apresentar riscos à saúde e segurança, se não forem tomadas as devidas precauções. As condições de rotina nas instalações de fabricação e o descarte final não devem representar qualquer ameaça à saúde e ao meio ambiente. Riscos surgem principalmente pela toxicidade e explosividade de gases específicos. Liberações acidentais de gases e vapores perigosos podem ser impedidos, com o treinamento específico de funcionários das empresas, em prol de realizar os procedimentos de segurança e um descarte criterioso e correto, nos parâmetros sócio ambientais, sendo realizado por métodos de separação de matérias primas, e recolocação no mercado novamente, do material reciclado (MULVANEY, 2019).

### 2.3.2 Política nacional de resíduos sólidos

O aumento populacional consecutivamente ocasiona no crescimento do consumo nas cidades, ocasionando uma grande demanda de painéis, causando uma grande quantidade de resíduos que são produzidos pelas residências ou até mesmo pelas fábricas que fazem o descarte inapropriado desses materiais, jogando em locais inapropriados, prejudicando a natureza e contaminando o solo, gerando diversos problemas ambientais. Com o intuito de reduzir o impacto de tantos resíduos que são jogados no meio ambiente, foi implementada em 2010 no Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (POLI, 2019 ), lei N° 12.305/10 regulamentada pelo decreto 7.404/10 que propões a prática de hábitos de consumo sustentáveis, a mesma tem outros objetivos como, estímulo a adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviço e articulação entre poder público, privado e a comunidade, essa define algumas



classificações importantes, como a diferença entre resíduos e rejeitos e as classificações. A PNRS foi um marco muito importante para a política ambiental brasileira, incentivando o descarte dos resíduos de forma correta e compartilhada, ajudando na reciclagem e na reutilização dos resíduos sólidos, entre os tipos de resíduos citados na lei, estão os, domiciliares, industriais, resíduos de saneamento público, da saúde, construção civil e os resíduos tóxicos (POLI, 2019).

Existem duas classificações legislativas para os resíduos sólidos, os relacionados a sua origem, destacando os industriais, e os oriundos de mineração, que podem ser gerados tanto pela pesquisa, extração ou beneficiamento. Em relação ao ramo comercial, a empresa em questão que se encaixa nas duas atividades, mineradora ou industrial, deverá desenvolver o PGRS (Plano de Gestão de Resíduos Sólidos), que é o conjunto de ações que a empresa, deve tomar junto ao poder público para viabilizar a coleta, tratamento e destinação final ambientalmente adequada. Todas essas etapas fazem parte da logística reversa, que apresentam uma prioridade de gestão, esse conceito é importante, pois se baseia no ciclo de coleta e restituição dos resíduos sólidos e no seu processo produtivo para a destinação final, conhecido como “ciclo de vida do produto”, onde as empresas em questão têm o papel de articular essa cadeia, devolvendo o resíduo para o mercado com outra finalidade, ou em outro caso, cuja as formas de tratamento se esgotem, elas devem encaminhar os rejeitos para o local adequado de disposição (MATERIAIS, 2020).

A PNRS é uma lei vigente, ou seja, o seu descumprimento acarretará em prejuízos, sanções e até mesmo multas, em contrapartida, a empresa que implementa o PGRS vai ter grandes vantagens, tais como, marketing positivo, sustentabilidade, redução de custos e impostos (MATERIAIS, 2020). Portanto, fica claro que a gestão de resíduos sólidos é extremamente importante para que as empresas diminuam a produção de rejeito, dessa forma cumprindo com a legislação e diminuindo o impacto no meio ambiente, e contribuindo para uma sociedade sustentável.

## **2.4 Matriz energética e estimativa para produção de resíduos**

O Brasil tem como um dos recursos utilizados a energia solar, esta representa uma taxa de 2% da matriz elétrica do país, sendo capaz de atingir 2,9% até o final deste ano (2021), de acordo com a ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Nos últimos três anos, o aumento de energia solar centralizada (geradas em grandes usinas) foi de 200%, ao mesmo tempo que a energia solar

distribuída (pequenas centrais de geração) ultrapassou 2.000%. Segundo o ministério de minas e energia, só no ano passado, a capacidade instalada em energia solar fotovoltaica cresceu, e atingiu índices de 66% no país (BRASIL, 2021). De acordo com um levantamento realizado pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), a energia solar fotovoltaica apresentou um forte crescimento dentro das estatísticas de matrizes energéticas brasileiras (INSOL, 2021). A pesquisa também aponta que ganhos de eficiência na produção são projetados e deverão permitir para os próximos 5 anos, uma economia de 41 TWh. O crescimento na matriz de energia limpa irá ajudar o Brasil a honrar o compromisso que assumiu na cúpula do clima, que aconteceu neste ano, para antecipar a neutralidade climática de 2060 para 2050 (GOVERNO DO BRASIL, 2021). A cúpula de líderes sobre o clima aconteceu em abril deste

Ano (2021), com o objetivo de debater quais deverão ser as principais medidas climáticas, que as maiores economias do mundo pretendem adotar nos próximos anos. O Brasil fez sua participação estipulando metas ambiciosas, visando a neutralidade climática, ressaltando a presença das fontes limpas na matriz energética brasileira, com níveis no presente correspondendo a 3% das emissões globais anuais, possuímos uma das matrizes energéticas mais limpas, com investimentos, renovados em energia solar, eólica, hidráulica e biomassa (SOLAR, 2021).

#### 2.4.1 Cenário Global

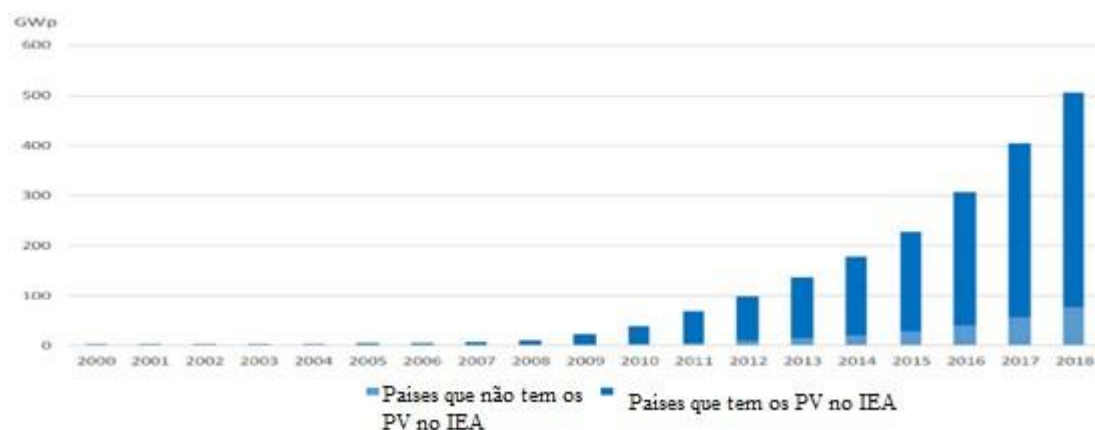
O mundo está evoluindo em ritmo acelerado a nível tecnológico, nos últimos anos foram introduzidas novas tecnologias no aproveitamento de energias renováveis, como por exemplo o caso da energia solar térmica e fotovoltaica. A busca dessa fonte de energia para as residências tem crescido bastante, e existe cada vez mais a utilização na produção de energia elétrica em grande escala através de parques e usinas solares, em todo mundo. (ABSOLAR, 2020). Sendo produzida através do sol é convertida em energia útil, a energia solar, como já mencionado, pode ser utilizada para a produção de eletricidade ou algo relacionado a suas principais aplicações. Anualmente o sol produz 4 milhões de vezes mais energia do que consumimos, todavia, o seu potencial é ilimitado. Tendo uma ideia, o sol produz em apenas um segundo mais energia internamente que toda energia usada pela humanidade desde o começo dos tempos. Outra forma de demonstrar essa grandeza energética, basta mencionar que a energia que a terra recebe por ano proveniente do sol, representa mais de 15000 vezes o consumo anual de energéticos, 15% da energia emitida pelo sol que chega

na terra é refletida de volta para o espaço, outros 30% são perdidos pela forma de evaporação da água a qual sobe para a atmosfera, produzindo as chuvas (ABSOLAR, 2020).

Dados de abertura de 2018 do mercado global de PV da International Energy Agency (IEA) (GAETAN et al, 2019) demonstram um mercado anual de PV em um nível correspondente ao do ano de 2017. No qual pelo menos 99,8 GW de sistemas fotovoltaicos foram instalados e comissionados por todo o mundo. A China vem liderando o ranking de países que investem consideravelmente em energia solar fotovoltaica, implicando diretamente no crescimento do mercado de painéis solares, tanto residenciais quanto comerciais. Com a construção da maior usina flutuante do mundo, com 116 mil painéis fotovoltaicos, podendo gerar 40 MW de eletricidade. Além disso, é considerado um dos países que mais possuem usinas solares, totalizando uma marca de 400 em todo o território chinês. A China é considerada o gigante da energia solar, visto que desde meados de 2015 possui uma capacidade total de instalação de 36 GW, e com uma estimativa para que sua capacidade fotovoltaica atinja 400 GW até 2030. O continente asiático ainda conta com outra grande potência que é o Japão, que após o acidente nuclear de Fukushima, começou a investir em energia solar, expondo os riscos que a energia nuclear trás, os esforços foram tantos, que chegaram a criar uma cidade que funciona totalmente por meio de energia solar, a chamada Fujisawa Sustainable Smart Town (SOLAR, 2020). A evolução da capacidade global total instalada é apresentada na Figura 8. No final de 2018 era de pelo menos 500 GW, ou seja, metade de um TW. Em nível mundial, a China continua liderando o ranking, com uma capacidade acumulativa de 176,1 GW, logo em seguida vem a União Europeia com 115,0 GW, EUA (62,2 GW), Japão (56,0 GW) e a Índia (32,9 GW). Na União Europeia, a Alemanha lidera com 45,4 GW, seguida pela Itália (20,1 GW) e por fim do Reino Unido com 13,0 GW. A Austrália atingiu 11,3 GW. Todos os outros países estão abaixo da marca de 10 GW (GAETAN MASSON, 2019). Os países que compõem o IEA representam 429,6 GW de instalações fotovoltaicas cumulativas juntas, principalmente conectadas à rede, no final de 2018. A IEA avalia 27 países com pelo menos 85% da capacidade fotovoltaica total global (GAETAN MASSON, 2019). Países que não fazem parte da IEA representam pelo menos 75,9% GW adicionais: Índia com pelo menos 32,9 GW, Reino Unido com 12,9 GW, Grécia com 2,7 GW, Taiwan com 2,7 GW, Paquistão com 2,4 GW, República Tcheca com 2,2 GW, Brasil com 1,6 GW, Ucrânia com 1,6 (GAETAN MASSON, 2019). Romênia com 1,4 GW e por fim a Bulgária com

1,0 GW. Diversos países instalaram sistemas fotovoltaicos, mas nenhum atingiu a escala GW.

Figura 8 - Capacidade global instalada até 2018.



Fonte adaptada de: (GAETAN, 2019)

Diante dos dados apresentados acima, entende-se que a produção de resíduos proveniente das placas tende a crescer exponencialmente. O somatório final de lixo eletrônico no mundo, deverá chegar na casa dos 52 milhões de toneladas, até 2021 (UNITED, 2019). Da mesma forma, os resíduos anuais que são projetados de painéis fotovoltaicos serão responsáveis, por mais de 850.000 toneladas, até o final de 2020, de acordo com o cenário de perda antecipada modelado pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), representando 1,6% do lixo eletrônico total, todavia, o número global de resíduos de painéis, aumentará consideravelmente Nos próximos anos.

Figura 9 – Resultados cumulativos de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050

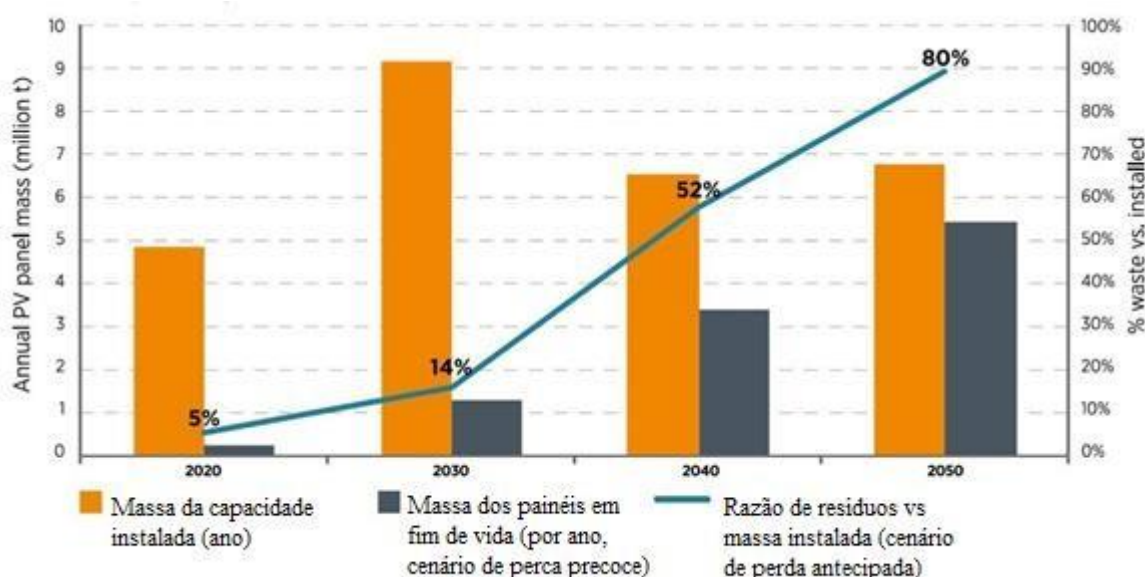


Fonte adaptada de: (IRENA, 2016).

A estimativa do lixo anual oriundo dos painéis fotovoltaicos até 2050 é mostrado na Figura 9, ilustrando a evolução no final de sua vida útil, e das novas instalações dos painéis fotovoltaicos. Essa relação se inicia com números muito inferiores, com 5% no final de 2020, por exemplo (ou seja, no cenário de perdas antecipadas, desperdício anual de 220.000 toneladas em Comparação com 5 milhões de toneladas em novas instalações (IRENA, 2016).

O primeiro cenário, “*regular-loss scenario*” representa a perda dos painéis de forma regular e o segundo “*Early-loss scenario*”, mostra a perda precoce destes painéis durante sua vida Útil. Estima-se que o lixo esperado nos dois cenários, se cruzam em 2050. Há uma mudança neste cenário que prevê uma maior quantidade de resíduos em um determinado ano e o que prevê uma menor quantidade de resíduos. A intersecção está projetada para acontecer em 2046. Esse recurso de modelagem pode ser observado na Figura 9, que mostra o volume de resíduos de painéis fotovoltaicos no valor de mais de 80% do volume de novas instalações, como resultado do cenário de perda precoce em 2050 (IRENA, 2016). Na Figura 10 são apresentados Painéis fotovoltaicos instalados anualmente no mundo e em fim de vida útil 2020-2050 (em % de Resíduos *versus* total instalado por cenário de perda precoce (amarelo) e cenário de perda regular (cinza).

Figura 10 - Curva massa x residuo



Fonte adaptada de: (IRENA, 2016).

No estudo por Stephanie Weckend e colaboradores (2015) estima-se a quantidade de resíduos de painéis fotovoltaicos produzidos por países de 2016 até 2050 (ver Figura 10). Os países foram selecionados de acordo com a liderança regional, no quesito de implantação de PVs e crescimento esperado. As projeções foram modeladas usando os mesmos parâmetros de função Weibull, que é uma probabilidade acumulada das estimativas globais da seção anterior. Os volumes projetados de painéis fotovoltaicos em países individuais são baseados em instalações anuais já existentes, e futuras, e dependem dos dados de entrada, disponíveis em cada país. A capacidade fotovoltaica instalada cumulativa histórica foi usada como referência em cada país, juntamente com projeções futuras para 2030 (IRENA, 2016).

Figura 11 - Resultado modelados dos volumes acumulados estimados de resíduos de painéis fotovoltaicos no final de vida, por país (t).

| Anos                           | 2016          |                | 2020           |                | 2030             |                  | 2040              |                   | 2050              |                   |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Cenário(perda regular/precoc)  | regula<br>r   | precoc<br>e    | regula<br>r    | precoc<br>e    | regul<br>ar      | precoc<br>e      | regula<br>r       | precoc<br>e       | regula<br>r       | precoc<br>e       |
| <b>Ásia</b>                    |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| China                          | 5,000         | 15,000         | 8,000          | 100,000        | 200,000          | 1,500,000        | 2,800,000         | 7,000,000         | 13,500,000        | 19,900,000        |
| Japão                          | 7,000         | 35,000         | 15,000         | 100,000        | 200,000          | 1,000,000        | 1,800,000         | 3,500,000         | 6,500,000         | 7,600,000         |
| Índia                          | 1,000         | 2,500          | 2,000          | 15,000         | 50,000           | 325,000          | 620,000           | 2,300,000         | 4,400,000         | 7,500,000         |
| República da Coreia            | 600           | 3,000          | 1,500          | 10,000         | 25,000           | 150,000          | 300,000           | 820,000           | 1,500,000         | 2,300,000         |
| Indonésia                      | 5             | 10             | 45             | 100            | 5,000            | 15,000           | 30,000            | 325,000           | 600,000           | 1,700,000         |
| Malásia                        | 20            | 100            | 100            | 650            | 2,000            | 15,000           | 30,000            | 100,000           | 190,000           | 300,000           |
| <b>Europa</b>                  |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| Alemanha                       | 3,500         | 70,000         | 20,000         | 200,000        | 400,000          | 1,000,000        | 2,200,000         | 2,600,000         | 4,300,000         | 4,300,000         |
| Itália                         | 850           | 20,000         | 5,000          | 80,000         | 140,000          | 500,000          | 1,000,000         | 1,200,000         | 2,100,000         | 2,200,000         |
| França                         | 650           | 6,000          | 1,500          | 25,000         | 45,000           | 200,000          | 400,000           | 800,000           | 1,500,000         | 1,800,000         |
| Reino Unido                    | 250           | 2,500          | 650            | 15,000         | 30,000           | 200,000          | 350,000           | 600,000           | 1,000,000         | 1,500,000         |
| Turquia                        | 50            | 70             | 100            | 350            | 1,500            | 11,000           | 20,000            | 100,000           | 200,000           | 400,000           |
| Ucrânia                        | 40            | 450            | 150            | 2,500          | 5,000            | 25,000           | 50,000            | 100,000           | 210,000           | 300,000           |
| Dinamarca                      | 80            | 400            | 100            | 2,000          | 4,000            | 22,000           | 40,000            | 70,000            | 130,000           | 125,000           |
| Rússia                         | 65            | 65             | 100            | 350            | 1,000            | 12,000           | 20,000            | 70,000            | 150,000           | 200,000           |
| <b>América do Norte</b>        |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| EUA                            | 6,500         | 24,000         | 11,000         | 85,000         | 170,000          | 1,000,000        | 1,700,000         | 4,000,000         | 7,500,000         | 10,000,000        |
| México                         | 350           | 800            | 850            | 1,500          | 6,500            | 30,000           | 55,000            | 140,000           | 650,000           | 1,500,000         |
| Canadá                         | 350           | 1,600          | 700            | 7,000          | 13,000           | 80,000           | 150,000           | 300,000           | 650,000           | 800,000           |
| <b>Oriente Médio</b>           |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| Emirados Árabes                | 0             | 10             | 50             | 100            | 3,000            | 9,000            | 20,000            | 205,000           | 350,000           | 1,000,000         |
| Arábia Saudita                 | 200           | 250            | 300            | 1,000          | 3,500            | 40,000           | 70,000            | 220,000           | 450,000           | 600,000           |
| <b>África</b>                  |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| África do Sul                  | 350           | 550            | 450            | 3,500          | 8,500            | 80,000           | 150,000           | 400,000           | 750,000           | 1,000,000         |
| Nigéria                        | 150           | 200            | 250            | 650            | 2,500            | 30,000           | 50,000            | 200,000           | 400,000           | 550,000           |
| Marrocos                       | 0             | 25             | 10             | 100            | 600              | 2,000            | 4,000             | 32,000            | 50,000            | 165,000           |
| <b>Oceânia</b>                 |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| Austrália                      | 900           | 4,500          | 2,000          | 17,000         | 30,000           | 145,000          | 300,000           | 450,000           | 900,000           | 950,000           |
| <b>América Latina/Caribe</b>   |               |                |                |                |                  |                  |                   |                   |                   |                   |
| Brasil                         | 10            | 10             | 40             | 100            | 2,500            | 8,500            | 18,000            | 160,000           | 300,000           | 750,000           |
| Chile                          | 150           | 200            | 250            | 1,500          | 4,000            | 40,000           | 70,000            | 200,000           | 400,000           | 500,000           |
| Equador                        | 10            | 15             | 15             | 100            | 250              | 3,000            | 5,000             | 11,000            | 25,000            | 35,000            |
| <b>Geral</b>                   | <b>43,500</b> | <b>250,000</b> | <b>100,000</b> | <b>850,000</b> | <b>1,700,000</b> | <b>8,000,000</b> | <b>15,000,000</b> | <b>32,000,000</b> | <b>60,000,000</b> | <b>78,000,000</b> |
| <b>Soma dos países líderes</b> | <b>28,040</b> | <b>187,255</b> | <b>72,160</b>  | <b>668,500</b> | <b>1,352,850</b> | <b>6,442,500</b> | <b>12,252,000</b> | <b>26,105,000</b> | <b>48,685,000</b> | <b>67,975,000</b> |
| <b>Resto do mundo</b>          | <b>15,440</b> | <b>62,745</b>  | <b>27,840</b>  | <b>181,500</b> | <b>347,150</b>   | <b>1,557,500</b> | <b>2,748,000</b>  | <b>5,895,000</b>  | <b>11,315,000</b> | <b>10,025,000</b> |

Fonte adaptada de: (IRENA, 2016).

## 2.4.2 Cenário brasileiro

O Brasil se comparado a outros países que são potências no assunto, como por exemplo Estados Unidos e Japão que estão em processo de desenvolvimento, fabricação e vendas aceleradas, ainda é iniciante no assunto, ora pelas políticas públicas que são destinadas ao seu incentivo ora, pelas suas promoções quanto regulamentar, fazendo com que isso promova a introdução e aumento desse tipo de matriz energética, porém o Brasil possui o benefício da vasta capacidade de produção e de recursos naturais, outro fator que auxilia, é a localização, pois o país

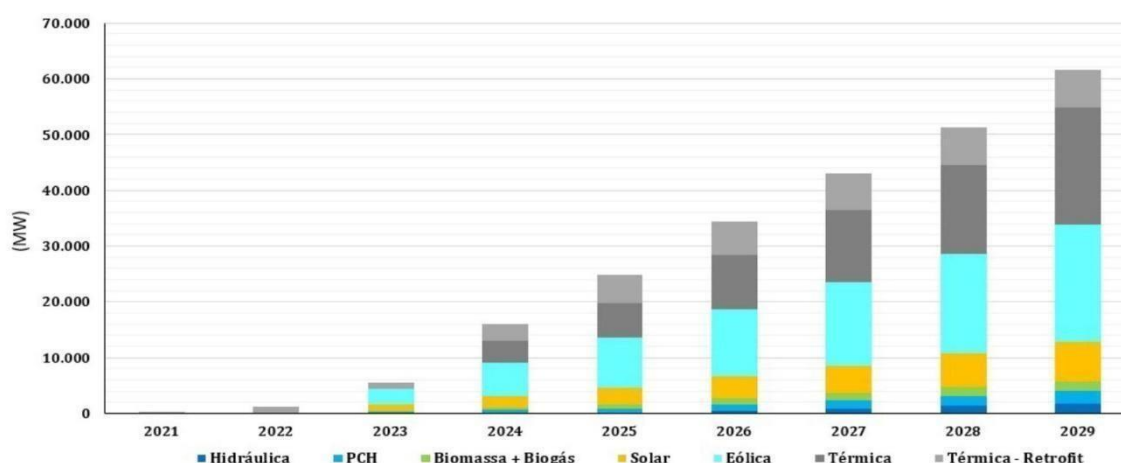


tem a melhor posição para a produção de energia solar no que se refere à localização geográfica e ainda conta com uma ampla mão de obra, devido a sua população, fazendo assim que possa ter Uma grande capacidade de produção de energia solar fotovoltaica (INVEST, 2021)

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em fevereiro de 2021, o Brasil conseguiu o marco de 500 mil unidades consumidoras de energia solar distribuída (GD), e a maior parte das instalações (73,6%) são situadas nas residências. A ABSOLAR aponta que, entre o número total de consumidores, 16,6% são representados por pequenos comércios, seguidos pelos setores industriais e rurais, que cresceram bastante nos últimos anos. Com metas estipuladas para responder às 500 mil unidades, 400 mil sistemas Solares foram instalados (ABSOLAR, 2021).

A Empresa de pesquisa energética (EPE) apresenta uma visão, em seu plano decenal de expansão de energia 2029 (PDE 2029), uma expansão de referência com incertezas inerentes a todo o processo de planejamento, um crescimento da geração fotovoltaica no Brasil. Os números são bastante motivadores para as projeções futuras e consideram uma taxa de crescimento do país, bem como o aumento da procura por energia. A energia fotovoltaica terá um crescimento de aproximadamente 12.000 Megawatt até o ano de 2029, conforme o Plano Decenal de Expansão De Energia (ver Figura 12) (PDE 2029).

Figura 12- Expansão Indicativa de Referência - PDE 2019



Fonte: (ENERGÉTICA, 2019)

Assim utilizando a mesma relação a resíduos/Mw e US\$/Mw. Empregada pela IRENA nas projeções com perspectivas futuras para o ano de 2050, a fonte fotovoltaica poderá produzir. No, aproximadamente 184.000 toneladas de resíduos, o que seria um mercado de aproximadamente



US \$40 milhões. O consumo de energia durante a reciclagem também deverá ser considerado no cálculo final, no processo de custo total.

#### 2.4.3 Cenário norte riograndense

Considerado um dos maiores estados que possui uma incidência superior, devido a sua proximidade com a linha do equador, o Rio Grande do Norte (RN), dispõe de níveis anuais de irradiação que atingem 18 Mj/m<sup>2</sup> ao dia (que representa a carga de incêndio) <sup>1</sup> segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil, o que, certamente eleva a sua eficiência nos painéis solares (SOLAR, 2020). Dessa forma, sendo considerado como um bom investimento, de acordo com a ANEEL, cerca de 56,3% das cidades do território potiguar, podem contar com sistemas fotovoltaicos. Fazendo com que o RN seja um dos maiores estados do Nordeste, no quesito a utilização de energia solar, ficando atrás somente para o Ceará e Pernambuco (SOLAR, 2020). Até o ano de 2019, os sistemas de energia solar do RN atingiram a marca de 1.986, divididos entre instalações residenciais, comerciais, rurais e até mesmo em serviços públicos, totalizando uma marca de 28.264,62 KW de potência instalada (SOLAR, 2020). Contribuindo para a redução dos impactos ambientais, o Rio Grande do Norte conta com mais de mil usinas fotovoltaicas, entre micro e minigeração de energia instaladas. A construção dessas usinas fornece a produção de 15 MW de potência, principalmente nos municípios como Mossoró e Caicó. Além disso, esses investimentos poderão permitir a geração de vários empregos nesse ramo, gerando novas oportunidades de negócio que contribuirá para a economia do estado e dos municípios em questão. Além de facilitar a composição de uma matriz elétrica mais variada (SOLAR, 2020).

O preço para a instalação de placas solares no Rio Grande do Norte varia, ora pela área de instalação, ora pelo tamanho do imóvel, e o consumo médio de energia mensal, assim, como a eficiência indicada nos equipamentos que serão usados. Todavia, o valor da mão de obra imposta, e os equipamentos utilizados na mesma, podem ser estimados em uma média de R\$ 15 mil para residências, possibilitando uma economia de até 95% no valor da conta de luz (SOLAR, 2020). Devido ao índice de irradiação solar que é favorável, o retorno sobre o investimento para um sistema fotovoltaico residencial no Rio Grande do Norte pode ser gerado entre 3 e 4 anos.

---

<sup>1</sup>  
Considerando que sua vida útil é de 25 anos, se caracteriza como um investimento rentável e promissor. Segundo SOLAR (2020):

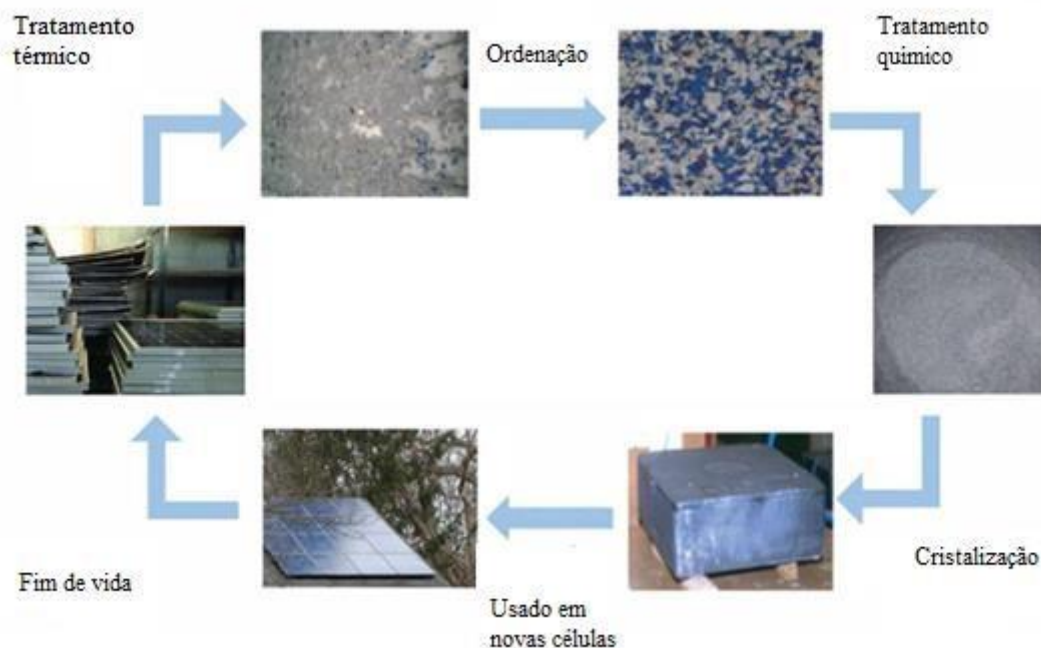
“Com a expectativa de crescimento no setor. Cerca de 40% somente neste ano de 2021, os modelos denominados microgeração distribuída, que são usados em residências. O crescimento em 2021 pode chegar até em 90%, segundo autoridades de economia do estado do RN. O setor está em ascensão atualmente, com a retomada de investimentos dos consumidores, retomando aos percentuais anteriores, que foram bastante reduzidos, por causa da pandemia de Covid-19, que enfrentamos no ano passado (G1, 2021)”

### **3. TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM**

A reciclagem dos módulos gastos pode não ser vista como um problema recorrente no Desenvolvimento de energia solar. Entretanto, o crescimento acelerado da energia solar ocasiona Problemas de destinação adequada de resíduos no futuro próximo, pois o fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos geraria uma quantidade preocupante de resíduos (FTHENAKIS, 2018). O descarte de pequenas quantidades de módulos fotovoltaicos em locais inadequados, tais como aterros sanitários, não deve causar riscos ambientais quando os módulos passam nos testes de lixiviação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), projetados para simular as condições de liberação. No entanto, é bastante reconhecido que em grandes escalas de implantação, a reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida seria necessária, a fim de evitar riscos de poluição ambiental e recuperar materiais valiosos. Em países da Europa, o setor fotovoltaico adotou uma abordagem proativa, atualmente exigida, a conformidade com os regulamentos necessários de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE). A Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos da Alemanha (EletoG), que exige a coleta e a reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), foi estendida ao PV em meados de 2015 e deve se tornar um padrão global. Os Estados Unidos necessitam de uma Política Nacional e da

Infraestrutura necessária para exigir a reciclagem de PV. Os regulamentos ambientais podem determinar o custo e a complexidade de lidar com módulos fotovoltaicos em fim de vida. Em casos de serem constatados de categoria “perigosa”, os requisitos especiais para manuseio, descarte, manutenção de registros e relatórios aumentarão de custo para que seja direcionado ao descarte dos módulos (FTHENAKIS, 2018). Hoje em dia, existem soluções comprovadas e bem testadas (o processo de separação e recuperação de material) para produtos c-Si, (baseados em wafer) e PV CdTe, mas não para outras tecnologias. O primeiro passo na reciclagem dos dois tipos de modelos citados é a separação das caixas de junção e para o c-Si, as estruturas de alumínio. As etapas seguintes tratam da separação do vidro e do módulo elétrico. Para os módulos c-Si. Assim, o tratamento térmico queima os laminados para facilitar os processos de separação (denominados de delaminação do módulo). A maneira mais prática de conseguir isso é através da pirólise, fazendo aquecer o módulo a 450-600°C para decompor o encapsulante orgânico. Logo após a delaminação, os componentes são separados manualmente, o vidro é enviado para um local adequado para a sua finalidade, como uma instalação de reciclagem de vidro e as pastilhas de silício são devidamente processadas ainda mais, polindo e reutilizando a pastilha ou ocorrendo a reciclagem do silício em uma nova pastilha (Figura 13) (FTHENAKIS, 2018). Nas etapas em que ocorre a separação, o fio de cobre, armação de alumínio, vidro, silício e resíduos são separados e enviados para os recicladores. Já o plástico é transformado em outros materiais, como mangueiras, frascos para produtos de limpeza, sacos em geral, tubulações para irrigação, no processo de reciclagem.

Figura 3.1 - Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino.



Fonte adaptada de: (FTHENAKIS, 2018)

Primeiro, os módulos deverão ser transportados para entrar no processo de reciclagem. Em seguida, os “string boxes” que são a parte de proteção, que conecta os cabos vindo dos módulos fotovoltaicos ao inversor, são desmontados manualmente. O tratamento térmico, queima os laminados para facilitar os processos de separação. Das etapas de separação, fio de cobre, estrutura de alumínio, vidro e resíduos são separados. Nos próximos passos, as células solares são tratadas quimicamente. As camadas de superfície e difusão são removidas posteriormente por etapas de limpeza. As células e a quebra do *wafer* são limpas através de uma decapagem com ácido. Os “String Boxes” deverão ser processados por uma empresa de tratamento térmico. Os resíduos vão para um aterro sanitário destinado a essa finalidade. O alumínio pode ser reutilizado, enquanto o vidro, cobre e silício podem ser vendidos para empresas de reciclagem interessadas. O processo térmico pode ser melhorado em relação a sua produtividade, tempo de ciclo de vida e rendimento total, o rendimento das células recuperadas depende em grande parte do tipo, design e estado (se estão muito danificados) dos modelos a serem devidamente

Processados (FTHENAKIS, 2018).

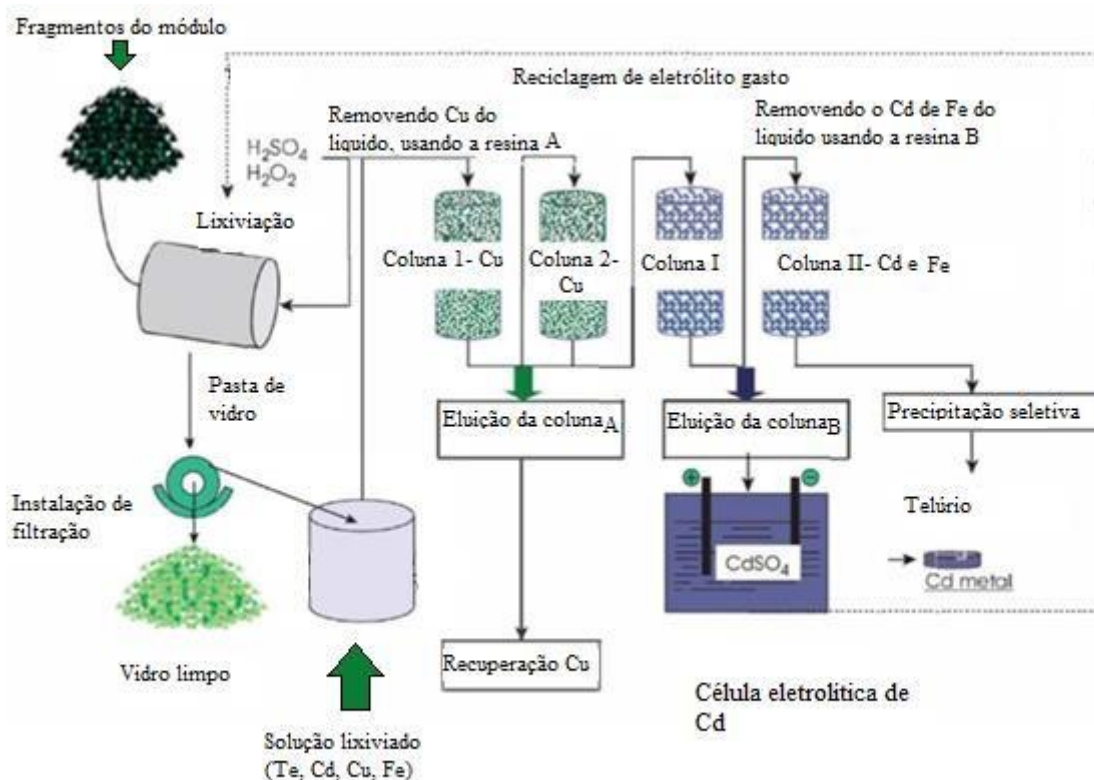
A reciclagem dos painéis CdTe é um pouco mais avançada. A mesma se baseia em uma Tecnologia hidro metalúrgica de baixo custo e ecológica, desenvolvida pelas empresas First Solar e pela BNL que são empresas atuantes no ramo da energia solar e reciclagem dos módulos. Essa

tecnologia envolve travar os módulos, remover os filmes finos do substrato e recuperar os materiais de filmes finos da solução conforme descrito a seguir (Figura 14). A princípio, os módulos são cortados por uma trituradora e logo após quebrados em pequenos pedaços com um moinho de martelos. As peças são expostas a lixiviação usando uma mistura

Diluída de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, que extrai os metais (principalmente cobre) e os elementos semicondutores (telúrio e cádmio). Do ponto de vista geológico a técnica da lixiviação consiste em um processo de deslocamento de minerais que estão presentes na superfície do solo, com a exposição desta área devido às queimadas, ao desmatamento ou até mesmo sobre o pastoreio, as ações das chuvas gradativas dissolve os nutrientes que são hidrossolúveis e deixa o solo para o plantio infértil, afetando aos produtores rurais e a fauna daquela região. Uma coluna de troca iônica é então usada para separar o cobre e o cádmio da solução, resultando em uma solução rica em telúrio de onde o Te é extraído por precipitação

Seletiva. O cádmio é enxaguado e recuperado eletroliticamente.

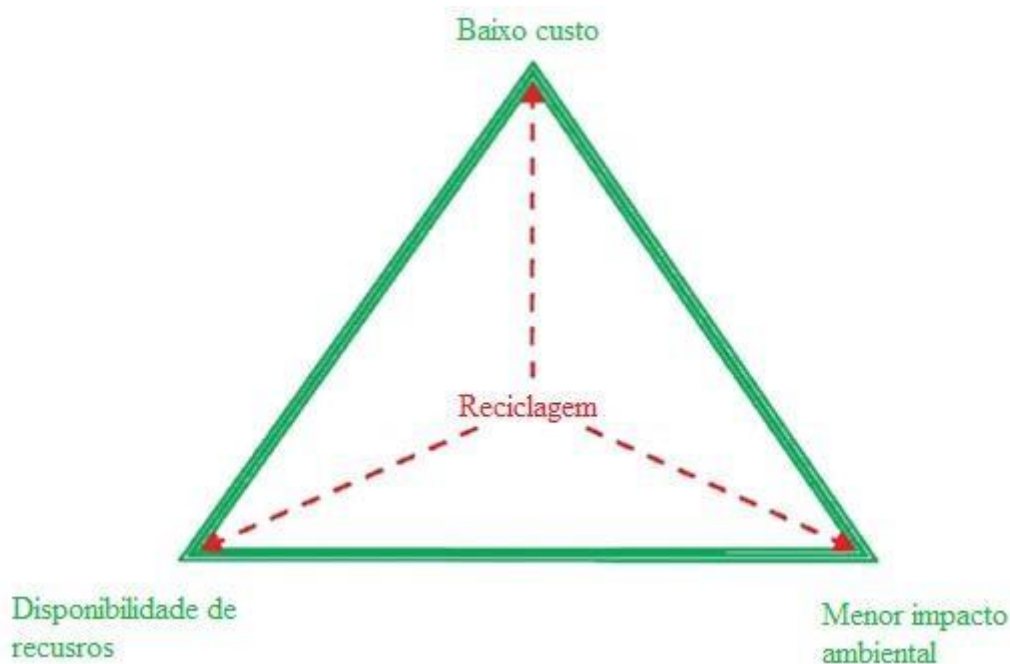
Figura 3.2 – Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe.



Fonte adaptada de: (FTHENAKIS,2018)

Fthenakis (2018), considera que, a disponibilidade de recursos, a acessibilidade e os baixos impactos ambientais causados são três pilares principais do crescimento sustentável da energia fotovoltaica para os níveis que permitirão justamente essa transição da eletricidade atual, que se baseia-se em combustíveis fósseis para uma renovável. A reciclagem de módulos fotovoltaicos se faz em três dimensões da sustentabilidade (Figura 15).

Figura 15 – A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV



Fonte adaptada de: (FTHENAKIS,2018)

Na figura 15, como podemos observar, um triângulo que representa os 3 pontos da reciclagem, onde no centro podemos ver que a reciclagem só depende se os outros pontos estiverem em equilíbrio, onde destaca-se o baixo custo, na parte de cima, a disponibilidade de recursos no canto inferior esquerdo, e finalizando com o menor impacto ambiental, tornado uma relação entre esses fatores.

A reciclagem colabora a evitar a escassez dos materiais que se fazem necessários para a produção e reduz o custo dos módulos fotovoltaicos. Atualmente os programas destinados à reciclagem são estabelecidos para apenas dois tipos de módulos fotovoltaicos: CdTe e c-Si. O primeiro faz a recuperação primeiramente do vidro e seguinte os elementos semicondutores para a reutilização na síntese do CdTe, enquanto o segundo recupera apenas a estrutura de alumínio e o vidro. A reciclagem fotovoltaica de tecnologias maduras (c-Si e CdTe) são técnicas

Economicamente viáveis. (FTHENAKIS, 2018)

### **Criação de valor com a reciclagem dos painéis fotovoltaicos**

Atualmente existem métodos para a criação de uma taxa em cada segmento da cadeia dos valores dos painéis fotovoltaicos, já incluindo o último estágio do ciclo de vida. De modo geral, as oportunidades de criação de valor estão relacionadas às reduções no uso do material, as opções para o reparo e reutilização, reciclagem e o tratamento dos resíduos de painéis fotovoltaicos. Assim, a criação de valores em diferentes caminhos da cadeia de valor solar foi estudada nas publicações da IRENA “os benefícios socioeconômicos da energia solar e eólica” (2014) e

“Benefícios de energia renovável: impulsionando indústrias locais” (2016). Além destes a IRENA publicou o resultado de um projeto P&D, em junho de 2016 (IRENA, 2016),

apresentando valores que poderão ser criados até 2050 com a reciclagem de painéis fotovoltaicos. Desse modo, a IRENA afirma que é possível criar um valor destinado é para a destinação mais adequada dos painéis com a sua reciclagem, extraindo matéria-prima secundária dos painéis fotovoltaicos no final do seu ciclo de vida, e disponibilizando-as novamente para o mercado (IRENA, 2016). Aproximadamente com uma vida útil em média de 30 anos, os painéis fotovoltaicos irão acumular um grande estoque de matérias-primas em produtos que não estarão à disposição para a recuperação por um período considerável. Por exemplo, não é esperado um grande fluxo de reciclagem de prata dos painéis até meados de 2025 (IRENA, 2016). A seguinte premissa foi adotada para a estimativa de

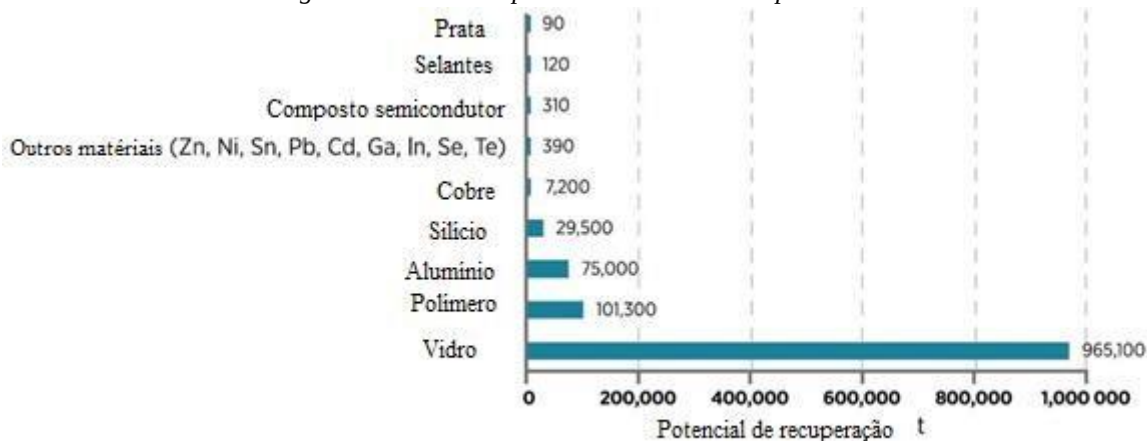
Reaproveitamento de matérias primas: As matérias-primas podem ser tratadas e recicladas a uma taxa de aproximadamente 65% a 70% em massa. Essas taxas de recuperação já são atingidas hoje em dia, e estão alinhadas com o único regulamento existente para a reciclagem de painéis fotovoltaicos até o momento, a diretoria WEEE da UE. Elas também são umas taxas combinadas e assumem uma taxa de coleta de 85% do fluxo total de resíduos fotovoltaicos no final da sua vida útil, assim como, as tecnologias de tratamento e reciclagem de alto valor que são

Disponibilizadas a fim de recuperar a maioria das frações de material. Portanto, exclui perdas no processamento mecânico (por exemplo, triturador e pós moagem) e recuperação térmica de frações de polímeros não recicláveis (tais como plástico duro). (IRENA, 2016). Tais estimativas são baseadas nas taxas de tecnologia das células fotovoltaicas, por exemplo (c-Si, CdTE, CIGS) e

composição de resíduos relacionada e multiplicada pelo volume acumulado de 1,7 milhão de toneladas para 2030 no cenário de perda regular. (IRENA, 2016). As estimativas de valor monetário que são relatadas, tem base nos preços de mercado do ano de 2016 (EUROPÄISCHER, 2016) e podem variar no futuro devido à, primeiramente as possíveis flutuações de preços no mercado de matérias-primas, em segundo plano, pelas mudanças na composição de

Matérias-primas dos painéis fotovoltaicos. Os resultados de possíveis matérias-primas acumuladas Recuperadas até 2030 são exibidos na Figura - 16.

Figura 16 - Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030



Fonte adaptada de (IRENA, 2016)

O potencial valor total do material recuperado por meio de tratamento e reciclagem dos PV chega a US \$450 milhões até 2030. Figura 16 Isso equivale ao valor atual da matéria-prima que é precisa para produzir 60 milhões de novos painéis, ou 18 GW. Em comparação, 180 Milhões de novos foram produzidos em 2015.

Figura 17 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030





Fonte adaptada de: (IRENA, 2016)

Na figura 17, vemos o ciclo completo do gerenciamento dos Pvs no final de sua vida útil, passando pelas recuperações de matérias primas, e geração de empregos nesse setor, até a capacidade acumulada até 2030.

Mais de 80% do peso dos painéis fabricados com qualquer tecnologia fotovoltaica é referente ao vidro; portanto, a maior massa de material de reciclagem vem do vidro, que é estimado em aproximadamente 9600.00 toneladas até 2030, por conseguinte, o desenvolvimento de tecnologias que são eficientes de reciclagem de vidro para painéis fotovoltaicos é essencial. Com um preço médio de mercado de material secundário para vidro de US \$30-50/t, dependendo da qualidade da recuperação (EUROSTAT, 2014), o potencial de valor de recuperação ultrapassa a margem de US\$28 milhões. Estima-se que quantidade significativas de alumínio (Au), aproximadamente 75.000 toneladas, e cobre (Cu), aproximadamente 7.000 toneladas, sejam lançadas no mercado de materiais secundários por meio do tratamento de painéis fotovoltaicos. Ambos podem ser facilmente reciclados usando os recursos que temos hoje em dia. Seu valor combinado atualmente chega até US\$140 milhões (EUROPÄISCHER, 2016). Se comparados com a produção mundial em 2015, 58.300 toneladas (US Geological Survey, 2016). Esses

Materiais citados agregam um importante suprimento adicional de matéria-prima até 2030. O uso de material para as células compostas de silício, foi reduzido consideravelmente na última Década, de cerca de 16 gramas/Wp para menos de 4 gramas /Wp devido ao aumento da Eficiência. As tecnologias cristalinas de silício continuam a dominar o mercado fotovoltaico. Isso significa que até 30.000 toneladas de silício, um material valioso, podem potencialmente ser recuperados até 2030, assumindo baixas perdas de rendimento. Sendo equivalente a quantidade de silício necessária para produzir mais de 45 milhões de outros novos painéis, ou cerca de US \$380 milhões (usando os preços atuais de poli silício a US \$20/kg e uma taxa de recuperação de valor que chega a 70%) (IRENA, 2016). Adotando o mesmo cenário de perdas regulares até 2050, o potencial de valor das matérias-primas desbloqueadas deverá subir para mais de US \$15 bilhões. Figura 18. O equivalente à matéria-prima necessária para a produção de dois bilhões de Novos painéis – 630 GW. A tonelagem de matéria-prima que é recuperada pode ser Comercializada e enviada como matérias-primas primárias a partir de recursos extrativos tradicionais. Os volumes injetados de volta à economia podem ser bastantes úteis para a produção de novos painéis fotovoltaicos, ou outros produtos, elevando assim a sua segurança de suprimento futuro de fotovoltaicos, ou produtos diversos que sejam dependentes das suas Matérias-primas secundárias, mas que sejam oriundas de PV no final de sua vida (IRENA, 2016).

Figura 18 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050



Fonte adaptada de: (IRENA:, 2016)

## Reciclagem na Europa

O projeto europeu CABRISS, que foi lançado em 2015, divulgou que os resíduos de painéis fotovoltaicos podem ser extremamente rentáveis. Atrelado a isso, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), publicou um estudo que afirma que em 2050 a quantidade de resíduos de PV poderia valer milhões de euros no mercado mundial de produtos essenciais, sempre que for realizada uma reciclagem adequada e os materiais sejam reutilizados (LUZ SOLAR, 2020). A primeira usina de reciclagem de painéis da Europa, já existe, a Veolia e a PV CYCLE juntos tomaram a iniciativa, e fica localizada na França, inaugurada em 2018, tem a capacidade para reciclar 3,5 milhões de painéis por ano. Todos os componentes são separados e reciclados, e após esse processo são encaminhados para setores que utilizam esses materiais, o vidro retorna para a indústria do vidro, o silício para o ramo dos metais preciosos e uma mistura de grânulos, que são provenientes de cabos conectores podem ser usados na fabricação de novos cabos e componentes

eletrônicos, o objetivo é que 95% do material possa ser reciclado (SPIN SOLAR, 2019). Os robôs da fábrica da Veolia desmontam os painéis para a recuperação dos

Materiais como o vidro, silício, plásticos, cobre e prata, que são esmagados, para serem usados na fabricação de novos painéis (LUZ SOLAR, 2020).

### **3.1 BENEFÍCIOS DA ENERGIA SOLAR**

A energia solar é uma fonte de energia que é abundante, permanente, renovável e que não emite combustíveis fósseis na atmosfera, além de ser sustentável, todavia, não significa que não possa causar danos ao meio ambiente. Os impactos que são causados são relacionados a impactos Localizados, e que podem ser reversíveis, com tratamento imediato (SUNERGIA, 2018).

Diversos benefícios podem ser colocados em questão com a utilização e a reciclagem das energias fotovoltaicas. Como por exemplo: Redução da emissão de gases do efeito estufa. A manutenção solicitada é mínima. Placas solares são resistentes às intempéries., economicamente viável, redução de gases como óxido de nitrogênio, óxido de enxofre e monóxido de carbono, fácil instalação, queda de preços devido ao avanço tecnológico, valorização do imóvel, vida útil de mais de 25 anos, sendo quitada em até 7 anos e equipamentos fotovoltaicos podem ser reciclados.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Pode-se concluir que a reciclagem de painéis fotovoltaicos tem se tornado primordial, devido ao crescimento da busca no mercado, por essa fonte de energia limpa e renovável. Embora muitos desenvolvimentos para a reciclagem ainda estejam em modo de incubadora, o cenário futuro para as técnicas de reciclagem, atrelado ao avanço tecnológico tem se tornado promissor, além das vantagens que a energia fotovoltaica acarreta para o meio ambiente, visto que é uma fonte de energia limpa, e que não emite gases do efeito estufa, reduzindo as suas emissões na atmosfera. Neste trabalho foram apresentadas informações que comprovam que o mundo está passando por uma transição na sua matriz energética e que mais energias renováveis irão substituir outras fontes. Atualmente as tecnologias fotovoltaicas estão competindo com as principais tecnologias de produção de energia. Se bem planejadas e implementadas a transição para quantidades crescentes de energia solar poderá ter impactos mínimos ao meio ambiente, atrelado com as leis e normas vigentes que atuam para que assegurem que as empresas que atuam no mercado de vendas de

painéis fotovoltaicos deem o final adequado para os módulos, ao término de sua vida útil. Como a tecnologia fotovoltaica é a protagonista desta transição, o gerenciamento de painéis fotovoltaicos durante o seu ciclo de vida útil possui o potencial de desenvolver novos caminhos para o crescimento da indústria, criando oportunidades de emprego para diferentes partes interessadas, sendo um elemento vital na transição do mundo, para um futuro de energia sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Hugo. **Fontes do Desenvolvimento: Fatores naturais e capacitação de mão de obra impulsionam expansão da energia solar no RN**: 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2021/04/29/fontes-do-desenvolvimento-fatores-naturais-e-capacitacao-de-mao-de-obra-impulsionam-expansao-da-energia-solar-no-rn.ghml>. Acesso em: 02 out. 2021.
- ANDREA BETTANIN. O uso de tiosulfato para a recuperação de prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- ANEEL ANUNCIA QUE BRASIL SUPEROU OS 2,3 GW DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO SOLAR INSTALADA. 2020. Absolar. São Paulo. 17 mar. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/aneel-anuncia-que-brasil-superou-os-23-gw-de-capacidade-de-geracao-solar-instalada/>. Acesso em: 05 set. 2021.
- ANSELMO, Antonio Harley. **Reciclagem ou Destinação Final Dos Painéis Fotovoltaicos Aplicados Em Geração de Energia ao Final Do Ciclo de Vida**. 2019. 56 f. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2019.
- ARAÚJO, Ericka. **Em discurso na Cúpula de Líderes sobre o Clima, Brasil destaca fontes limpas**: 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/em-discurso-na-cupula-de-lideres-sobre-o-clima-brasil-destaca-fontes-limpas/>. Acesso em: 13 out. 2021.
- ARAÚJO, Ericka. **Materiais fotovoltaicos começam a ser reciclados no Brasil**: 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/mateiras-fotovoltaicos-comecam-a-ser-reciclados-no-brasil/>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- A RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES TEM UM LONGO CAMINHO A PERCORRER, E O SILÍCIO PODE SER A CHAVE. 2020. Absolar. São Paulo. 17 jul. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/a-reciclagem-de-paineis-solares-tem-um-longo-caminho-a-percorrer-e-o-silicio-pode-ser-a-chave/>. Acesso em: 05 ago. 2021.
- BRASIL ASSUME 16ª POSIÇÃO NO RANKING MUNDIAL DE ENERGIA SOLAR: PAÍS AVANÇOU CINCO POSIÇÕES ENTRE 2018 E 2019, DESTACA ABSOLAR. 2020. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/noticias/53140046/brasil-assume-16a-posicao-noranking-mundial-de-energia-solar>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- BRASIL ENTRA NO TOP 10 DE PAÍSES QUE MAIS INSTALARAM ENERGIA SOLAR

EM 2020: O MAIOR PAÍS DA AMÉRICA LATINA REGISTROU 3,15 GIGAWATTS (GW) EM NOVOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO SOLAR AO LONGO DO ANO PASSADO, E ALCANÇOU COM ISSO A NONA COLOCAÇÃO DO RANKING GLOBAL. 2021. Exameinvest. 24 mai. 2021. Disponível em: <https://invest.exame.com/esg/brasil-entra-notop-10-de-paises-que-mais-instalaram-energia-solar-em-2020>. Acesso em: 19 set. 2021.

BRASIL SUPERA 500 MIL UNIDADES CONSUMIDORAS DE ENERGIA SOLAR EM 2021: Entre essas unidades, 73,6% foram instaladas em residências, aponta a ABSOLAR. 2021. Ciclovivo. 14 mai. 2021. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/planeta/energia/brasil-supera-500-mil-unidades-consumidoras-de-energia-solar-em-2021/>. Acesso em: 26 jul. 2021.

CASARIN, Ricardo. **Efeitos da pandemia no setor solar brasileiro ainda não podem ser mensurados, diz Greener**. 3. ed. São Paulo: 2020.

CÉLULA FOTOVOLTAICA: VEJA COMO FUNCIONA UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA E QUAIS OS CUIDADOS QUE VOCÊ PRECISA TER ANTES DE COMPRAR.. VEJA COMO FUNCIONA UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA E QUAIS OS CUIDADOS QUE VOCÊ PRECISA TER ANTES DE COMPRAR. Portalsolar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em: 29 ago. 2021.

CIENTISTAS NORTE-AMERICANOS DESENVOLVEM CÉLULA SOLAR MAIS EFICIENTE DO MUNDO. 2017. Portalsolar. 17 ago. 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/cientistas-norte-americanos-desenvolvem-celula-solar-mais-eficiente-do-mundo.html>. Acesso em: 21 set. 2021.

CUNHA, Danilo Candido. SANTOS, Paulo Henrique Frois. FREITAS, Daniel Araújo Corrêa. **Energia Solar Fotovoltaica No Brasil**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 11, Vol. 05, pp. 148-161 Novembro de 2018. ISSN:2448-0959

DESCARTE DE PAINÉIS SOLARES, E AGORA? 2019. Spinsolar. 04 dez. 2019. Disponível em: <https://spinsolar.com.br/descarte-de-paineis-solares-e-agora/>. Acesso em: 01 ago. 2021.

ENERGIA EÓLICA É A MAIS PROMISSORA PARA O BRASIL. 2019. Ecoa. 25 jan. 2019. Disponível em: [https://ecoa.org.br/energia-eolica-e-a-mais-promissora-para-o-brasil/?gclid=CjwKCAjw7fuJBhBdEiwA2ILMYbIJ2rvbVxUYYagZlgMIrgJPDGBhrw9FhZwcGNW2vAThztZu1qu3RoCAYQQA\\_vD\\_BwE](https://ecoa.org.br/energia-eolica-e-a-mais-promissora-para-o-brasil/?gclid=CjwKCAjw7fuJBhBdEiwA2ILMYbIJ2rvbVxUYYagZlgMIrgJPDGBhrw9FhZwcGNW2vAThztZu1qu3RoCAYQQA_vD_BwE). Acesso em: 04 out. 2021.

ENERGIA RENOVÁVEL CHEGA A QUASE 50% DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: ESTUDO INDICA QUE O BRASIL LIDERA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ENTRE OS PAÍSES DOS BRICS. ESTUDO INDICA QUE O BRASIL LIDERA

GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ENTRE OS PAÍSES DOS BRICS. 2021. GovernodoBrasil. 10 ago. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-ecombustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1>. Acesso em: 09 nov. 2021.

ENERGIA SOLAR AJUDA BRASILEIROS NESTE MOMENTO DE PANDEMIA. 2020. Portalsolar. 22 abr. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energiarenovavel/energia-solar-ajuda-brasileiros-neste-momento-de-pandemia.html>. Acesso em: 01 set. 2021.

ENERGIA SOLAR ESTÁ GANHANDO MAIS ESPAÇO NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. 2021. Insol. 25 fev. 2021. Disponível em: <https://insolenergia.com.br/blog/energia-solar-esta-ganhando-mais-espaco-na-matriz-energeticabrasileira->. Acesso em: 29 ago. 2021.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA CHINA. Portalsolar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-na-china>. Acesso em: 24 ago. 2021.

ENERGIA SOLAR NO RIO GRANDE DO NORTE. Portalsolar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-no-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 26 set. 2021.

ENKHARDT, S. A AIE espera 115 GW das novas instalações fotovoltaicas este ano. PV Magazine - Newsletter, 25 set. 2019.

FADDUL, Juliana. **Energia solar cresce 70% no Brasil apesar da pandemia e espera 2021 positivo**. 3 ed. Minas Gerais. 2021.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. Energia solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotérmica e fotovoltaica.: Ed universitária da UFPE. Recife, 1995.

GASES DO EFEITO ESTUFA. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-doefeito-estufa/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

HISTÓRIA E ORIGEM DA ENERGIA SOLAR. 2016. Portalsolar. 03 nov. 16. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>. Acesso em: 29 jul. 2021.

KAWASE, Camila. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: tudo o que você precisa saber**. 3. ed. Rio de Janeiro: 2020.



MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTANER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications**. Second. ed. Oxford: Academic Press of Elsevier, 2011.

NASSA, Thiago. **Energia solar cresce 22,5% no mundo com mais de 115 gigawatts instalados no último ano**. 3, ed. Minas Gerais, 2020.

OLSEN, Natasha. **O que acontece com o painel solar quando termina sua vida útil?**. 3. 3d. São Paulo: Atlas. 2020.

PAÍSES QUE MAIS INVESTEM EM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E OUTRAS ENERGIAS RENOVÁVEIS. 2020. Quantum. 11 nov. 2020. Disponível em: <https://www.quantumengenharia.net.br/paises-que-mais-investem-em-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 15 set. 2021.

PROJETO ALEMÃO FINANCIADO PELA UNIÃO EUROPEIA PODERÁ RECICLAR 50.000 PLACAS SOLARES POR ANO. Bluesol Energia Solar. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/reciclagem-placas-solares/>. Acesso em: 02 ago. 2021.

RECICLAGEM DE PLACAS SOLARES. Luzsolar Disponível em: <https://luzsolar.com.br/reciclagem-de-placas-solares/>. Acesso em: 02 ago. 2021.

RESÍDUOS SÓLIDOS: COMO LIDAR COM ELES NA SUA EMPRESA? 2020. Materiaisjr. 22 out. 2020. Disponível em: [https://materiaisjr.com.br/residuos-solidos-como-lidar-com-eles-na-sua-empresa/?gclid=CjwKC\\_AjwzOqKBhAWEiwArQGwaGx5f2kVf6JsEYd6uZf3dyRC\\_\\_mcf1hsvw27GHv9I1cJ847tEHA90BoCedEQAvD\\_BwE](https://materiaisjr.com.br/residuos-solidos-como-lidar-com-eles-na-sua-empresa/?gclid=CjwKC_AjwzOqKBhAWEiwArQGwaGx5f2kVf6JsEYd6uZf3dyRC__mcf1hsvw27GHv9I1cJ847tEHA90BoCedEQAvD_BwE). Acesso em: 07 out. 2021.

SANTOS, Augusto Cesar da S., SANTOS, Marcelo Paulo de Lima, SILVA, Samila Batista. Os benefícios do uso de painéis solares para o meio ambiente. Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense v. 1, p. 373-376, 2010.

SOLAR POWER EUROPE. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2017. Belgium, 2015. Acesso em: 14 out. 2021.

SUNERGIA. Impacto da energia solar no meio ambiente/ benefícios da energia fotovoltaica. Disponível em Acessado em 07 de ago. de 2021.

VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA SOLAR. 2017. Ecoa. 23 jan. 2017. Disponível em: [https://ecoa.org.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/?gclid=CjwKCAjw7fuJBhBdEiwA2ILMYTCiCxTirZr7942QbtbyqwImNhZenVC\\_fRqfYUqAYdMoyizDHoF6zBoC7MYQAvD\\_BwE](https://ecoa.org.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/?gclid=CjwKCAjw7fuJBhBdEiwA2ILMYTCiCxTirZr7942QbtbyqwImNhZenVC_fRqfYUqAYdMoyizDHoF6zBoC7MYQAvD_BwE). Acesso em: 27 out. 2021.

VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Portalsolar.

Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar.html>. Acesso em: 11 out. 2021.

VÉRONIQUE MONIER (France). European Commision. Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive. Paris, 2011. Acesso em: 15 ago. 2021

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012.