



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE

**NELSON MONTEIRO DE SOUSA**

O DESAFIO DO DESCARTE FUTURO DOS RESÍDUOS DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

São Luís

2021

**NELSON MONTEIRO DE SOUSA**

O DESAFIO DO DESCARTE FUTURO DOS RESÍDUOS DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Clóvis Bôsko  
Mendonça Oliveira

Co-orientador: Profa. Dra. Lucylea  
Gonçalves França

São Luís

2021



**NELSON MONTEIRO DE SOUSA**

O DESAFIO DO DESCARTE FUTURO DOS RESÍDUOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira (Orientador)**

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

---

**Prof. Dra. Lucylea Gonçalves França (Co-orientador)**

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

---

**Prof. Dr. Darliane Ribeiro Cunha**

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

---

**Prof. Dr. Ivanilson Sousa da Costa**

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC/UEMA)

“Uma pessoa que nunca cometeu um erro  
nunca experimentou nada de novo”.

Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, que através dos ensinamentos deixados por Jesus Cristo deixam a vida mais justa.

A Jesus Cristo, por seus ensinamentos e palavras de amor, compaixão, compreensão, tolerância, humildade e sabedoria, as quais tento seguir para conduzir da melhor forma possível os caminhos de vida.

À minha família, por todo apoio e incentivo nos diversos momentos da minha vida e, em especial, à minha esposa Rita de Cassia, pela compreensão, paciência e apoio nos momentos mais difíceis de nossas vidas.

À Universidade Federal do Maranhão ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente e aos professores deste Programa, em proporcionar aos discentes um horizonte mais amplo de oportunidades.

## RESUMO

O conteúdo apresentado neste trabalho reporta fundamentalmente a questão da geração futura de resíduos de sistemas fotovoltaicos implantados no Brasil e as tratativas necessárias para a mitigação dos potenciais impactos provocados pelo descarte inadequado dos resíduos gerados, bem como para o aproveitamento das oportunidades geradas. O trabalho, basicamente, estabelece uma correlação entre energia e ambiente, voltados para a questão da geração de energia elétrica a partir da fonte solar fotovoltaica. O conteúdo foi construído com base na bibliografia existente em relatórios de associações e institutos do setor de energia conforme os estudos relatados por EPE (2020), EIA (2019) e IRENA (2021), onde é mostrado a evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo; artigos relacionados à tratativa da questão dos resíduos gerados por equipamentos eletroeletrônicos, conforme o trabalho apresentado por Forti *et al.* (2020), e de trabalhos científicos que relatam a situação normativa atual dos resíduos eletroeletrônicos no mundo, conforme os trabalhos apresentados por Sharma (2019), Parujuly *et al.* (2019) e Yue (2014). Como resultado, é mostrado que no Brasil, embora haja dispositivo legal para tratativa parcial do problema, a questão merece maior detalhamento e discussão, uma vez que a perspectiva futura apresenta números vultosos, tanto em desafios quanto em oportunidades. Muito embora exista um lapso temporal entre a aquisição do sistema e seu descarte, é fundamental que o país reflita, debata e se prepare para enfrentar o problema futuro do descarte dos resíduos de sistemas de geração de energia elétrica a partir da fonte fotovoltaica e desta forma, contribua para manutenção de uma visão sustentável da energia solar fotovoltaica como fonte de energia.

**Palavras-chave:** Resíduo Eletroeletrônico. Resíduo Fotovoltaico. Energia Solar Fotovoltaica.

## ABSTRACT

The content presented in this work fundamentally reports the issue of future generation of waste from photovoltaic systems implemented in Brazil and the necessary measures to mitigate the potential impacts caused by inadequate disposal of generated waste, as well as to take advantage of the opportunities generated. The work, basically, establishes a correlation between energy and environment, focused on the issue of electric energy generation from photovoltaic solar sources. The content was built based on existing bibliography in reports of associations and institutes of the energy sector, according to studies reported by EPE (2020), EIA (2019) and IRENA (2021), which shows the evolution of photovoltaic solar energy in Brazil and in the world; articles related to dealing with the issue of waste generated by electronic equipment, according to the work presented by Forti et al. (2020); and scientific papers that report the current normative situation of electronic waste in the world, according to the works presented by Sharma (2019), Parujuly et al. (2019) and Yue (2014). As a result, it is shown that in Brazil, although there is a legal provision for partial treatment of the problem, the issue deserves further details and discussion, since the future perspective presents large numbers, both in terms of challenges and opportunities. Even though there is a time lag between the acquisition of the system and its disposal, it is essential for the country to reflect, debate and prepare to face the future problem of the disposal of waste from electricity generation systems from photovoltaic sources, and from this way contribute to the maintenance of a sustainable vision of photovoltaic solar energy as an energy source.

**Keywords:** Electronic Waste. Photovoltaic Waste. Photovoltaic Solar Energy.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Matriz elétrica nacional 2019 - 2020.....	16
<b>Figura 2</b> - Capacidade instalada geração centralizada fotovoltaica.....	17
<b>Figura 3</b> - Capacidade instalada geração distribuída fotovoltaica .....	18
<b>Figura 4</b> - Destroços de usina solar em Porto Rico .....	21
<b>Figura 5</b> - Volume atual de sistemas outorgados .....	29
<b>Figura 6</b> - Quadro de desafios e recomendações PNE 2050 .....	30
<b>Figura 7</b> - Dejetos de animais nas ruas de Londres em 1893 .....	33
<b>Figura 8</b> - Descarte de pás de rotores eólicos .....	34
<b>Figura 9</b> - Sistemas de logística reversa implantados .....	40
<b>Figura 10</b> - Lixo eletroeletrônico .....	41
<b>Figura 11</b> - Ilustração resumida do processo de geração de REEs.....	43
<b>Figura 12</b> - Tipos de módulos fotovoltaicos .....	48
<b>Figura 13</b> - Componentes interno de um inversor fotovoltaico .....	49
<b>Figura 14</b> - Componentes principais de um módulo fotovoltaico. ....	50
<b>Figura 15</b> - Cooperativa de reciclagem de vidro .....	51
<b>Figura 16</b> - Contatos de prata em módulo fotovoltaico .....	53
<b>Figura 17</b> - Técnicas de reciclagem para diferentes tipos de módulos.....	55
<b>Figura 18</b> - Diretiva WEEE para União Europeia.....	60
<b>Figura 19</b> - Símbolo para produtos recicláveis .....	69
<b>Figura 20</b> - Mecanismo B2C na Alemanha.....	72
<b>Figura 21</b> - Sistemas B2C e B2B na Alemanha.....	73
<b>Figura 22</b> - Fluxo do uso de sistema fotovoltaicos.....	82

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Taxa de crescimento anual, 1990 a 2019 por tipo de fonte renovável....	17
<b>Gráfico 2</b> - Capacidade instalada mundial de geração fotovoltaica.....	18
<b>Gráfico 3</b> - Distribuição percentual das fontes renováveis de energia.....	19
<b>Gráfico 4</b> - Estimativa de geração de eletricidade por fonte até 2050 em milhão de GWh .....	20
<b>Gráfico 5</b> - Estimativa evolução da geração distribuída no Brasil.....	20
<b>Gráfico 6</b> - Previsão de capacidade instalada de eletricidade FV com zero emissão de CO <sub>2</sub> .....	24
<b>Gráfico 7</b> – Cenários de estimativas de geração de RSFV por países mais geradores .....	24
<b>Gráfico 8</b> - Previsão de geração de RSFV por cenários até 2050 .....	25
<b>Gráfico 9</b> - Crescimento populacional e PIB até 2050 .....	25
<b>Gráfico 10</b> - Capacidade de geração elétrica instalada até 2050, em cenário de emissão neutra.....	26
<b>Gráfico 11</b> - Estimativas de capacidade instalada e geração fotovoltaica para 2050 .....	28
<b>Gráfico 12</b> - Produção de resíduos per capita versus PIB.....	35
<b>Gráfico 13</b> - Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	37
<b>Gráfico 14</b> - Estimativa populacional brasileira.....	37
<b>Gráfico 15</b> - Taxa de coleta seletiva por região .....	38
<b>Gráfico 16</b> - Disposição final adequada X inadequada de RSU no BRASIL (T/ANO).....	38
<b>Gráfico 17</b> - Reservas mundiais de prata .....	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Tipos de materiais constituintes em um módulo de silício cristalino .....	22
<b>Tabela 2</b> - Quadro Resumo dos dados de REEE, por continente.....	44
<b>Tabela 3</b> - Comparação em massa (g/m <sup>2</sup> ) de diferentes tecnologias.....	48
<b>Tabela 4</b> - Principais características físicas entre encapsulantes .....	52
<b>Tabela 5</b> - Cronograma para atendimento das metas de coleta e REE .....	86
<b>Tabela 6</b> - Comparativo da logística reversa de REEE entre Brasil e UE .....	87

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a-Si - Silício amorfo;

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica;

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresa de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

ASSEPRO – Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação;

B2C - *Business-to-Consumer*;

CdS - Seleneto de cádmio;

CdTe - Telureto de cádmio;

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;

CFCs – Clorofluorcarbonos;

CIS - Cádmio-índio-selênio;

*ElektroG - Electrical and electronic equipment Act*;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética;

*EPSC - Stewardship: Electronic Product Stewardship Canada*;

EVA - Polietileno-co-acetato de vinila;

GaAs - Arseneto de Gálio;

GD – Geração Distribuída;

GREEN ELETRON – Gestora para Resíduos de Equipamentos eletroeletrônico Nacional;

HCFC - Hidroclorofluorcarbonetos;

IBAMA - Instituto brasileiro do meio ambiente;

*IEA – International Energy Agency*;

*IRENA – International Renewable Electric Energy Agency*;

MME – Ministério das Minas e Energia;

ONU – Organização das Nações Unidas;

*PAYG - Pay As You Go*;

PDE – Plano Decenal de Expansão da Energia Elétrica;

PIB – Produto Interno Bruto;

PNE – Plano Nacional de Energia;

RCB - Retardadores de chama bromados;

REEE – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos;

REN - Resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica;

*RQO - Recycler Qualification Office;*

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos;

RSVF – Resíduos de Sistemas Fotovoltaicos;

SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a gestão dos Resíduos sólidos;

UE- União Europeia;

*WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Crescimento da fonte solar fotovoltaica .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 O problema potencial da geração fotovoltaica .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 A questão dos resíduos de sistemas fotovoltaicos no Brasil .....</b>	<b>27</b>
<b>1.4 Metodologia .....</b>	<b>30</b>
<b>2 ENERGIA, SOCIEDADE E OS RESÍDUOS.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1 Os resíduos sólidos .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 A questão dos resíduos sólidos no Brasil .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3 Resíduos de Produtos Eletroeletrônicos .....</b>	<b>40</b>
<b>2.4 Acordo Setorial Brasileiro para Resíduos Eletroeletrônicos .....</b>	<b>44</b>
<b>2.5 O risco potencial dos resíduos de sistemas de geração fotovoltaicos .....</b>	<b>45</b>
<b>3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM FIM DE VIDA ÚTIL E SEUS RESÍDUOS GERADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Características conforme geração.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 Resíduos dos Módulos .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.1 Moldura .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.2 Vidro .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.3 Encapsulante .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.4 Prata .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.5 Demais Componentes.....</b>	<b>54</b>
<b>3.3 A importância da reciclagem para o planeta .....</b>	<b>56</b>
<b>4 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL SOBRE OS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS E FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 A diretiva europeia de resíduos eletroeletrônicos .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.1 Bases normativas na UE sobre energia e resíduos sólidos.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1.2 Eliminação e transporte dos REEE recolhidos segundo a diretiva 2012/19/UE .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.3 Taxa de coleta.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.4 Tratamento adequado .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.5 Transferências de REEE .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.6 Objetivos de valorização econômica dos materiais.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.7 Financiamento relativo aos REEE provenientes de particulares .....</b>	<b>67</b>

<b>4.1.8 Financiamento relativo aos REEE provenientes de utilizadores não-particulares .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.9 Informação aos usuários .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1.10 Centros de tratamento de REEE .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2 A situação atual de algumas nações em relação aos RSFV .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.1 A situação na Alemanha .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.2 Reino Unido .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.3 Itália .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.4 Suíça .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.5 Noruega .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.6 República Tcheca .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.7 Estados Unidos .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.8 Canada .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.9 China .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.10 Coreia do sul .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2.11 Japão .....</b>	<b>78</b>
<b>5 A REGULAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 Os resíduos eletroeletrônicos .....</b>	<b>80</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>92</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

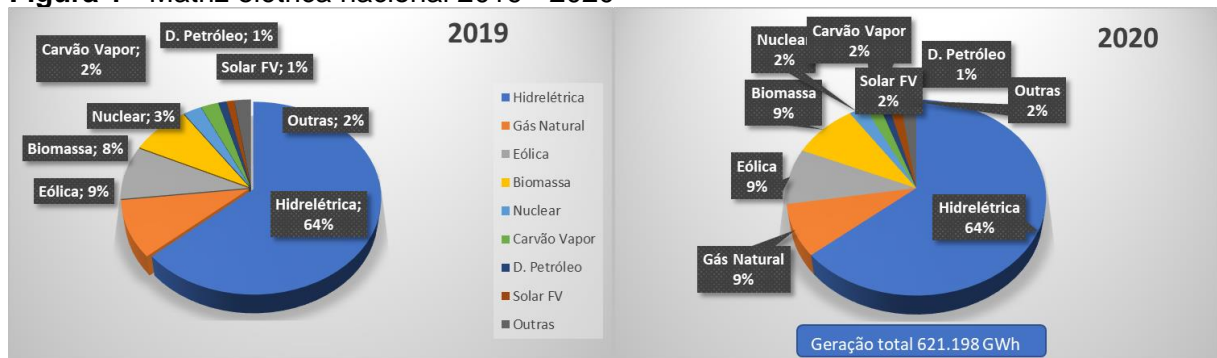
As estimativas de aumento da geração per capita de resíduos sólidos vêm associadas à expectativa de aumento do desenvolvimento socioeconômico da sociedade, este fenômeno ocorre em todas as regiões que passaram ou passam por este processo. Dentro do processo de geração de resíduos sólidos tem-se a produção dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), que podem provocar, caso não sejam bem geridos os processos de fim de vida útil deste tipo de material, perdas de elementos raros ou escassos na natureza, além de poder causar exposição dos seres vivos a substâncias e elementos químicos perigosos.

Para potencializar todos estes efeitos surge a questão dos resíduos de sistemas fotovoltaicos, que já é um assunto de preocupação nas regiões pioneiras deste tipo de tecnologia, mas com discurso ainda incipiente a nível de Brasil, porém que merece um olhar mais atento por parte das autoridades e sociedade para as devidas tratativas e as oportunidades que poderão ser geradas.

### **1.1 Crescimento da fonte solar fotovoltaica**

O Brasil testemunha, mais recentemente, e no mundo, o fenômeno da transição das matrizes energéticas de vários países. É cada vez maior a participação de fontes de energias renováveis nas matrizes energéticas, de natureza elétrica, das nações; capitaneadas, principalmente, pelas energias de fonte eólica e solar. Estas fontes de energias renováveis vêm modificando as matrizes energéticas dos países com participação cada vez maior no rateio energético. No caso particular do Brasil, a Figura 1 mostra a evolução da energia solar na matriz nacional entre 2019 e 2020 (EPE, 2021).

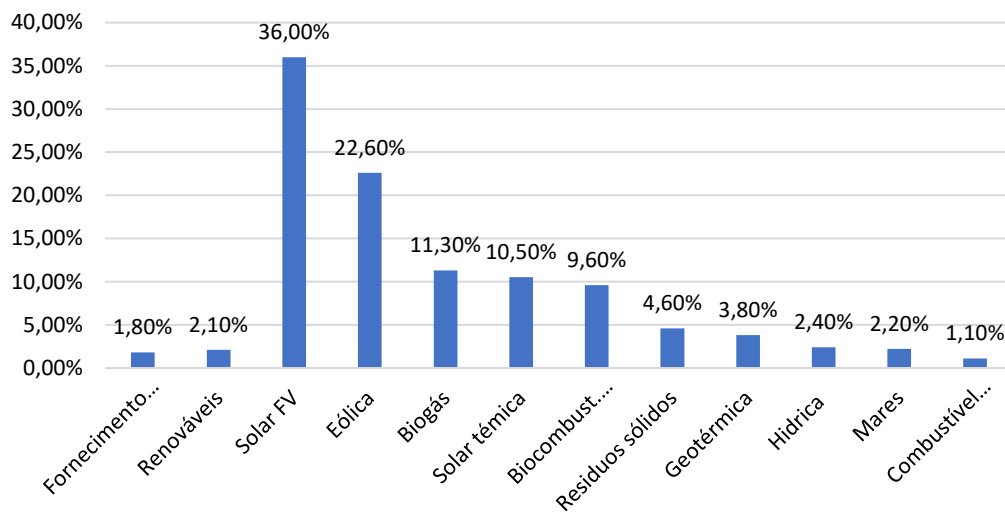


**Figura 1 - Matriz elétrica nacional 2019 - 2020**

Na análise de Xu *et al.* (2018), o consumo excessivo de combustíveis de origem fóssil tem causado, segundo a visão de grande parte da comunidade científica mundial, consequências danosas aos processos ambientais do planeta. Algumas previsões são catastróficas, até mesmo irreversíveis. Questões como estas, associadas aos custos das tarifas de energia elétrica e ao desenvolvimento de sistemas mais eficientes de geração fotovoltaica, contribuíram para impulsionar o crescimento da energia solar no mundo.

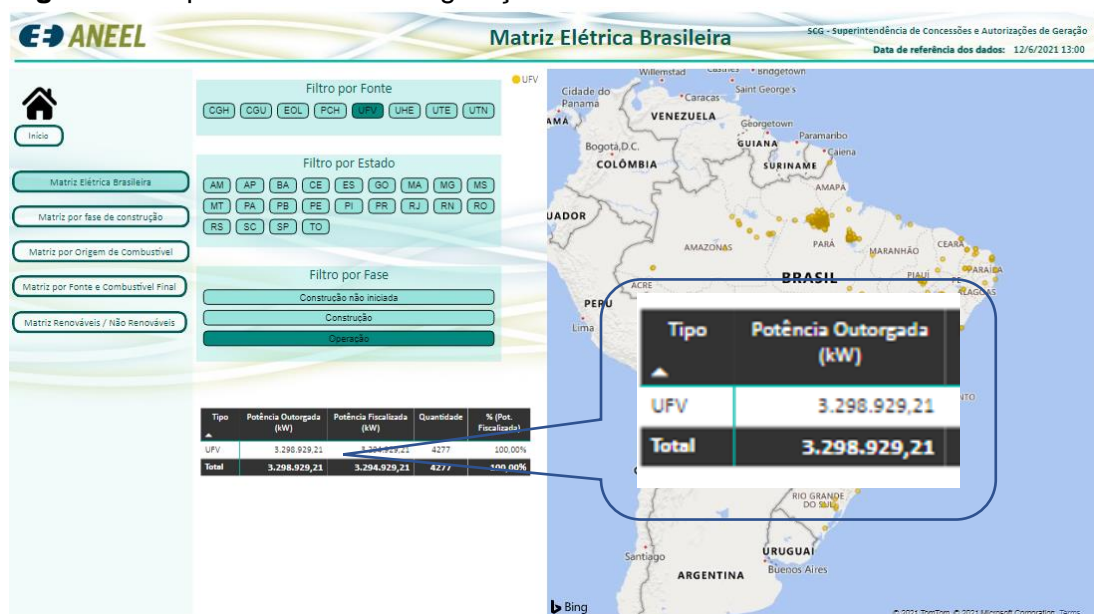
A geração de energia elétrica de fonte fotovoltaica cresce a elevadas taxas e vem reduzindo seus custos ano após ano, tornando-se cada vez mais democrática, no que tange a universalização do uso. Esta fonte de energia apresenta alta confiabilidade (MEYER; DYK, 2004) com baixíssimas taxas de manutenção e carga o atributo de energia verde, apresentando uma forte pegada ecológica, uma vez que vem contribuindo para redução da emissão de gases de efeito estufa, conforme Lira *et al.* (2019).

Segundo dados da IEA (2020), a energia solar apresenta uma taxa média aproximada de crescimento anual de 36% desde o ano 2000, apresentando mais de 13 pontos percentuais em relação ao segundo lugar, a energia de fonte eólica, com taxa média anual de 23%, conforme pode ser observado no Gráfico 1.

**Gráfico 1 - Taxa de crescimento anual, 1990 a 2019 por tipo de fonte renovável**

Fonte: Autor, dados IEA (2020)

No Brasil, a energia solar saiu de 12 MW instalados em 2012 para 9192,1 MW em 2021, sendo 3,29 GW em geração centralizada (Figura 2) e 5,89 GW em geração distribuída (Figura 3) instalados até junho de 2021. Este crescimento apresenta uma taxa média impressionante de aproximadamente 170%, desde o ano 2012. Até esta data, são mais de 508.209 unidades consumidoras (somente em GD), gerando sua própria energia, conforme consta no site da Agência Brasileira de Energia Elétrica (ANEEL, 2021).

**Figura 2 - Capacidade instalada geração centralizada fotovoltaica**

Fonte: ANEEL (2021)

**Figura 3** - Capacidade instalada geração distribuída fotovoltaica**GERACAO DISTRIBUIDA**

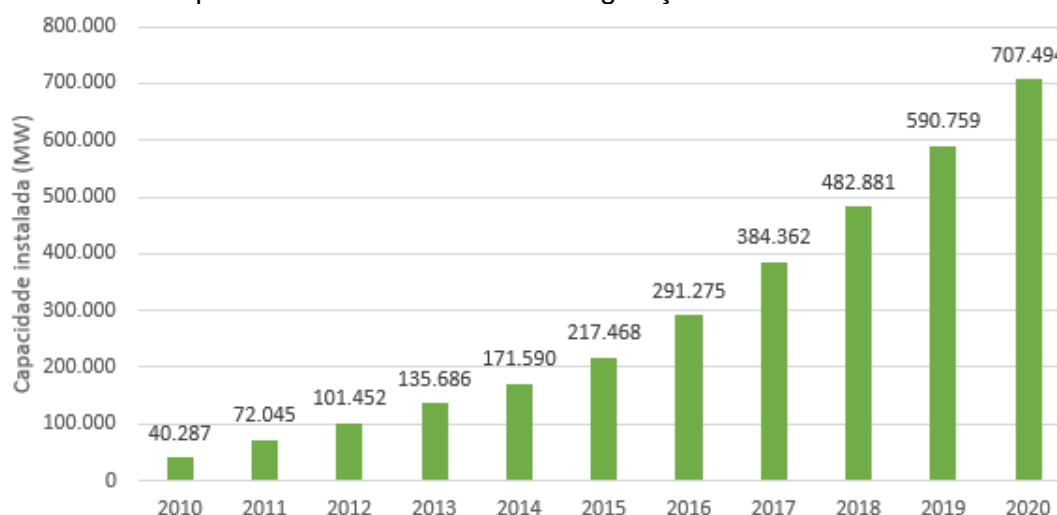
Versão Junho/2020

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	45	4.124	36.268,43
EOL	69	132	14.930,70
UFV	508.209	639.565	5.893.192,18
UTE	313	5.061	97.173,52

Total de usinas: 508.636	Total de UCs que recebem os créditos: 648.882	Potência total: 6.041.564,83 kW
<input type="button" value="VOLTAR"/>		

Fonte: ANEEL (2021)

Em relação à capacidade instalada e a quantidade produzida de energia por fonte solar fotovoltaica, segundo a agência internacional de energias renováveis (IRENA, 2021), em 2020 a capacidade fotovoltaica total instalada foi de 707.494 MW. O Gráfico 2 mostra a capacidade instalada no mundo. Segundo a mesma fonte, em 2018 foram geradas cerca de 549.828 GWh de energia no mundo, este valor corresponde a 25,3% de toda energia renovável gerada no mundo.

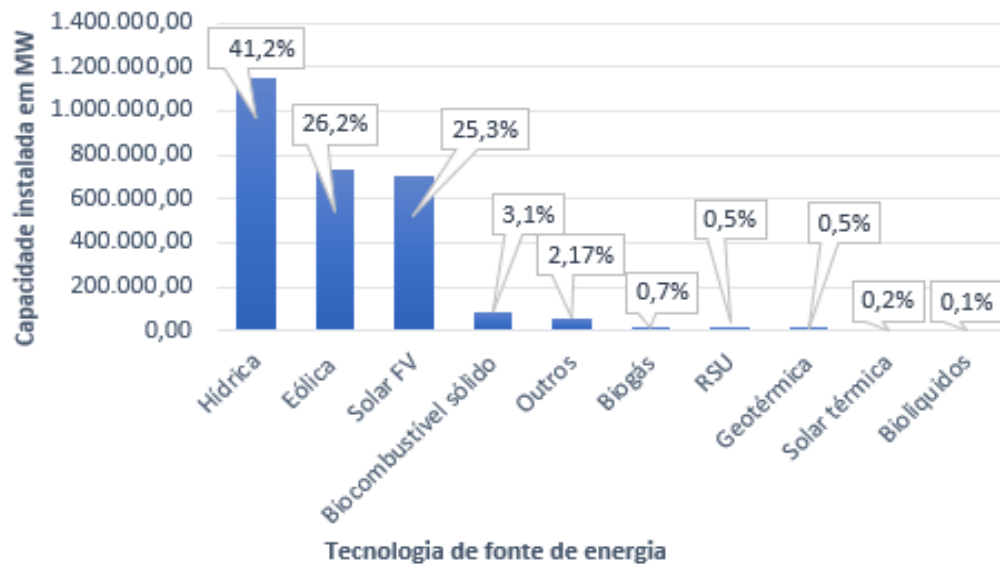
**Gráfico 2** - Capacidade instalada mundial de geração fotovoltaica

Fonte: Autor, dados IRENA (2021)

Hoje, em maior ou menor escala, a energia solar fotovoltaica está disseminada em todas as regiões do planeta, por apresentar justamente este perfil mais democrático de energia e com baixos custos de manutenção, quando

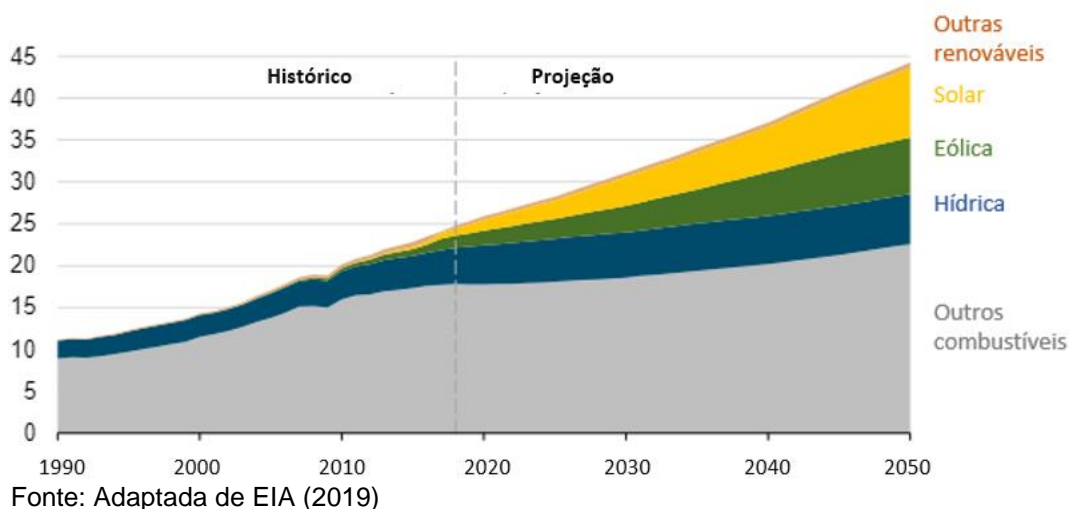
comparados com outras fontes de energia, conforme pode ser observado no Gráfico 3.

**Gráfico 3** - Distribuição percentual das fontes renováveis de energia.



Fonte: Autor, dados IRENA (2021)

A energia solar fotovoltaica se expandiu e se expande de uma forma tão acelerada que nem as crises econômicas estão sendo capazes de frear seu crescimento, pelo contrário, percebe-se que, mesmo nestes momentos, a expansão da energia fotovoltaica mantém um ritmo constante de crescimento, como é o exemplo do Brasil (ESTADÃO, 2021). Fatos como este corroboram com a percepção de que esta fonte de energia é definitiva, sem retorno e que contribuirá cada vez mais com maiores parcelas de geração nas matrizes energéticas dos países. As estimativas de IRENA (2021) e EIA (2019) são de que em 2050, a energia elétrica gerada a partir da fonte solar fotovoltaica atinja um patamar de 20% da matriz energética mundial (Gráfico 4).

**Gráfico 4** - Estimativa de geração de eletricidade por fonte até 2050 (em milhão de GWh)

Em relação aos números do Brasil, conforme observa-se no gráfico de projeção de geração distribuída do Plano Decenal de Expansão de Energia, PDE 2029 (EPE, 2020), o Brasil alcançou em 2020 o patamar esperado para 2024, ver Gráfico 5. À taxa atual, é provável superar a barreira dos 10 GW instalados antes de 2026.

**Gráfico 5** - Estimativa evolução da geração distribuída no Brasil.

Contudo, a energia solar fotovoltaica, em função do investimento inicial, considerado elevado, ainda é privilégio de somente parte da população que possui condições de aquisição de tais sistemas. Porém, a expectativa é que, cada vez mais, esta fonte de energia se dissemine nas residências, comércios, indústrias e se consolide de forma definitiva. Espera-se, portanto, que cada vez mais parcelas menos

favorecidas da população tenham acesso a esses sistemas de geração de energia, ou por redução dos custos de aquisição desses sistemas ou por programas de fomento ou linhas de financiamentos com aplicação de taxas mais atrativas.

## 1.2 O problema potencial da geração fotovoltaica

Acompanhando todo esse crescimento, surgem alguns questionamentos: quando os atuais e futuros sistemas chegarem ao fim de suas vidas úteis, o que deverá ser feito com os resíduos fotovoltaicos a serem descartados, como exemplo a imagem da Figura 4. Estes resíduos poderão ser reciclados, ou caso contrário, se não for possível sua reciclagem, poderão ser reaproveitados e quais problemas estes resíduos podem trazer ao meio ambiente. Dentro deste contexto surge novo questionamento, quais substâncias nocivas à saúde dos seres vivos e ao meio estes resíduos carregam, e como mitigá-las.

**Figura 4** - Destroços de usina solar em Porto Rico



Fonte: Forbes, Bob Meinetz (2018).

De uma forma geral, a composição dos Resíduos de Sistemas Fotovoltaicos (RSVF) são basicamente constituídos pelos mesmos elementos constituintes dos resíduos de produtos eletroeletrônicos (REEE). O que vem a destoar em relação aos REEE, pelo motivo de os módulos fotovoltaicos serem mais de 80% do sistema, é proporção dos elementos constituintes deste módulo, como exemplo o

vidro que envolve e encapsula as células fotovoltaicas.

Os materiais constituintes dos módulos provocam aos seres vivos e meio ambiente os mesmos efeitos que os resíduos REEE provocam. A Tabela 1 mostra um quadro resumo dos elementos constituintes de um módulo característico à base de silício cristalino, Lautnussa *et al.* (2016).

**Tabela 1** - Tipos de materiais constituintes em um módulo de silício cristalino

<b>MATERIAL</b>	<b>Percentual</b>
<b>Vidro, contendo antimônio (0,01-1 %kg de vidro)</b>	<b>70,000%</b>
<b>Alumínio</b>	<b>18,530%</b>
<b>Cobre</b>	<b>2,450%</b>
<b>EVA</b>	<b>5,100%</b>
<b>Camada da folha posterior (com base em fluoreto de polivinila)</b>	<b>1,500%</b>
<b>Silício metálico</b>	<b>3,560%</b>
<b>Prata</b>	<b>0,053%</b>
<b>Outros metais (chumbo, cádmio, estanho etc.)</b>	<b>0,053%</b>

Fonte: Adaptado de Lautnussa *et al.* (2016)

Com o aumento da demanda por sistemas fotovoltaicos é inegável também o incremento futuro na geração de resíduos destes sistemas. Conforme Dias *et al.* (2016), a quantidade de REEE gerados em todo o mundo é subestimada, pois não existem métodos precisos para determinar o total de lixo eletroeletrônico descartado no mundo. No entanto, neste aspecto, a questão dos RSFV é um tanto mais facilitada pela forma de como estes sistemas são implantados no mundo, como exemplo o caso do Brasil, onde todos os sistemas legalmente conectados à rede são todos registrados na ANEEL, da mesma forma no restante do planeta esta é a prática adotada.

Para Komoto e Lee (2018), o desenvolvimento de estratégias para a gestão do ciclo de vida do sistema irá estabelecer projeções futuras mais confiáveis sobre as reais quantidades de RSFV gerados, o que vem a ser uma tratativa para a problemática relatada por Dias *et al.* (2016) na aplicação aos RSFV.

Entretanto, caso não sejam tomadas ações para o desenvolvimento das estratégias mencionadas por Komoto e Lee (2018), os resultados poderão ser bastante danosos para o ambiente e pessoas. Descartes inadequados de RSFV podem se transformar em um problema grave nas regiões de destinação destes tipos

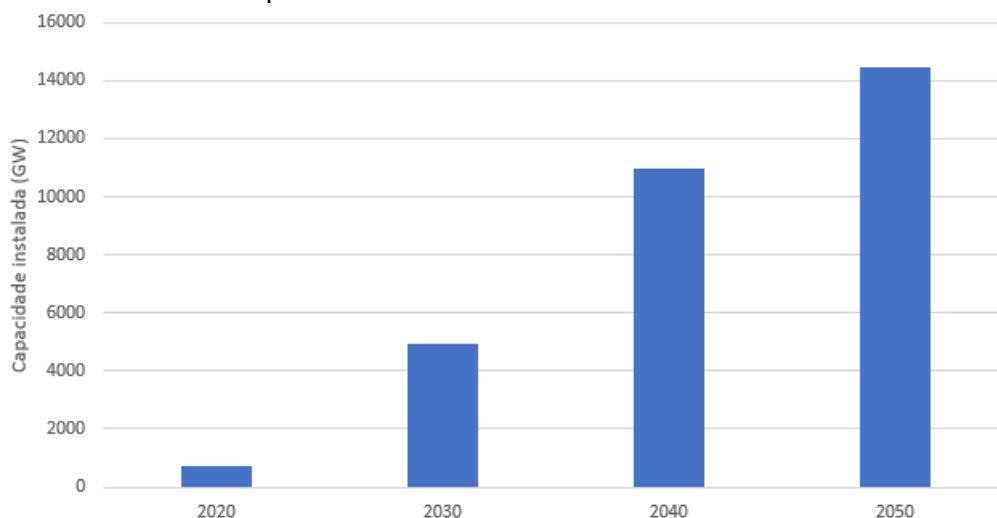
de produtos. Dentre os problemas gerados pelo descarte inadequado dos resíduos de módulos fotovoltaicos, temos: lixiviação de elementos químicos perigosos aos seres vivos, como chumbo e cádmio; perda de metais raros (prata, índio, gálio e germânio, e paládio) e perda de outros materiais recuperáveis, não tão raros, mas com valor econômico, como alumínio, silício e vidro, conforme relatado por Xu *et al.* (2018). Os metais preciosos contidos nos RSFV requerem manuseio especial e métodos de reciclagem específicos. Estes elementos existem em baixas concentrações nos componentes de sistemas fotovoltaicos o que torna sua recuperação bastante difícil (NELEN *et al.*, 2014).

Outro dado importante é o fato de as emissões de CO<sub>2</sub> geradas nos processos de produção de alumínio reciclado são de apenas 4,6% das emissões na fabricação de alumínio produzidos a partir de toda cadeia de extração desse mineral (DING *et al.*, 2012), sem falar das perdas de elementos que acontecem no processo (CHANCEREI *et al.*, 2009). A imagem da extração de metais preciosos pela mineração está associada a impactos ambientais negativos, devido aos efeitos causados no solo, aos cursos d'água, à fauna e flora da região afetada e nas comunidades do entorno e além destes aspectos, acrescenta-se as emissões de gases de efeito estufa e o uso de energia.

O grande desafio é como gerenciar todas estas questões, face que o volume de sistemas de geração fotovoltaica cresce a números exponenciais. Com capacidade instalada de mais de 700 GW atualmente, a energia solar se torna cada vez mais economicamente competitiva se expandindo e alcançando cada vez mais parcelas da população em todas as regiões do planeta. A estimativa da Agência Internacional de Energia (IEA) é que alcancemos em 2050 um total de 4675 GW de capacidade instalada (KOMOTO; LEE, 2018). No entanto, em um cenário de zero emissão de carbono (IEA, 2021), conforme observado no Gráfico 6, a capacidade instalada pode superar a casa dos 14000 GW em 2050.

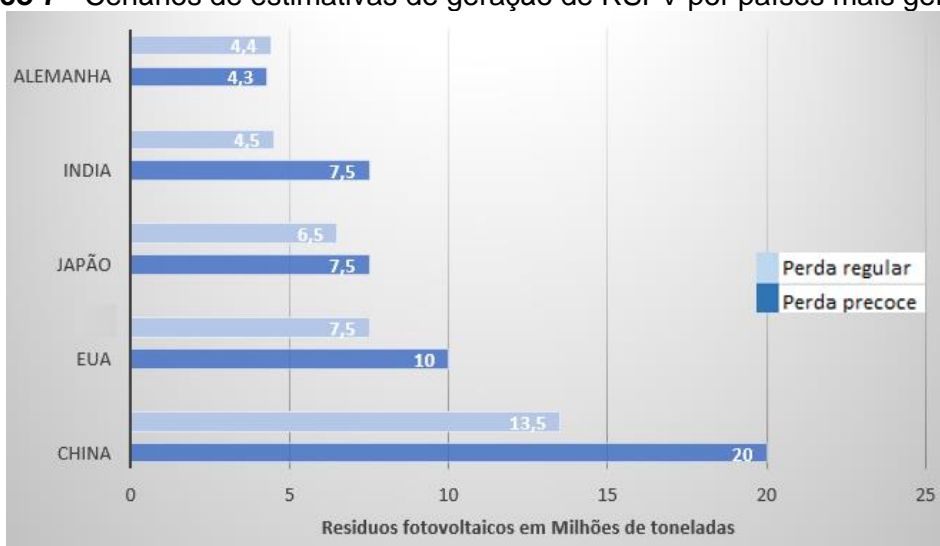
Em estudo apresentado em 2019, Sharma *et al.* (2019) mostram dois cenários para a geração de RSFV: um cenário considerando o ciclo de vida regular, onde não existem perdas prematuras dos equipamentos e outro cenário onde acontecem perdas prematuras de equipamentos, perdas estas que podem ocorrer por várias situações, como transporte, falhas prematuras ou mesmo perdas ocorridas durante a operação dos sistemas, motivadas, principalmente, por questões ambientais.



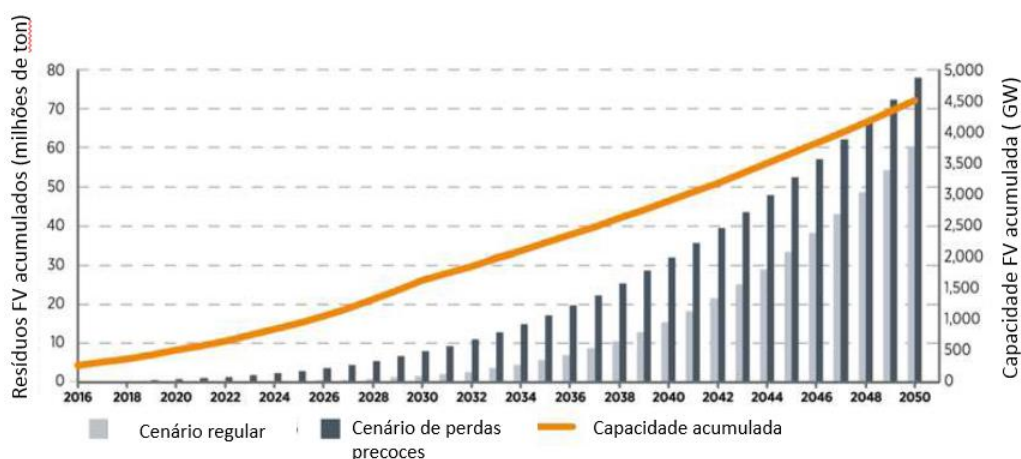
**Gráfico 6** - Previsão de capacidade instalada de eletricidade FV com zero emissão de CO<sub>2</sub>

Fonte: Autor baseado em IEA (2021)

As estimativas de geração de resíduos no cenário regular para 2030 são de um total de 1,7 milhão de toneladas, e para 2050 são de 60 milhões de toneladas de RSFV. Para o cenário com perdas prematuras, as estimativas alcançam números que vão até 8 milhões de toneladas em 2030 até 78 milhões de toneladas em 2050, conforme observado nos Gráfico 7 e 8. Os números, na verdade, deverão variar entre estes intervalos para qualquer cenário que reflita um futuro com poucas variações dos hábitos atuais praticados.

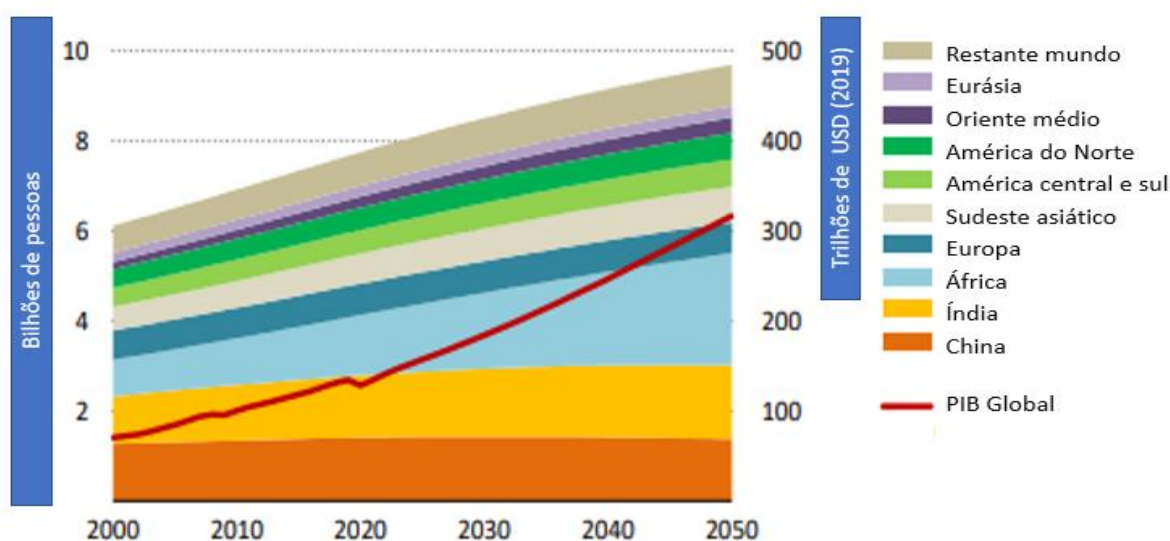
**Gráfico 7** - Cenários de estimativas de geração de RSFV por países mais geradores

Fonte: Adaptado de Report IEA-PVPS T12-10 (2018)

**Gráfico 8 - Previsão de geração de RSFV por cenários até 2050**

Fonte: IEA-PVPS T12-10 (2018)

Em 2050 a estimativa é que a população mundial alcance a marca de 9,7 bilhões de pessoas (Gráfico 9). Fazendo analogia com os números apresentados sobre os REEE, em 2050 a geração per capita de RSFV, em qualquer cenário, será superior a geração atual (base 2019) de REEE que está na marca de 53,6 milhões de toneladas, segundo Forti *et al.* (2020), com geração per capita de 7,3 kg de REEE por ano. No cenário com perdas, ou seja, com 78.000.000 de toneladas e uma população mundial alcançando os 9,7 bilhões de pessoas, a média por habitante no planeta será de 8,04 kg por ano.

**Gráfico 9 - Crescimento populacional e PIB até 2050**

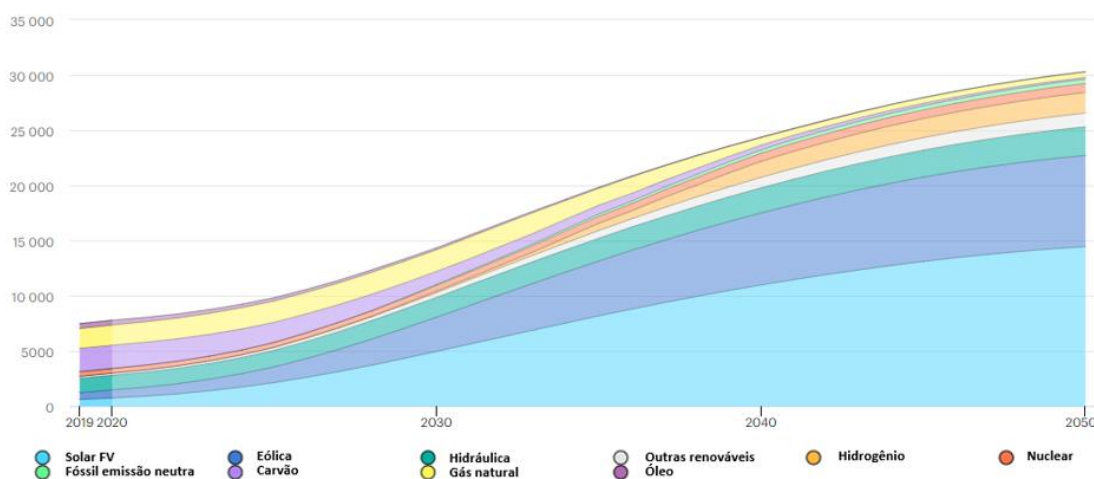
Fonte: Adaptado de IEA (2020)

A nível de comparação, considerando os dados da Tabela 1 para módulos fotovoltaicos de silício monocristalino e tendo os elementos mais perigosos e raros

(prata, cádmio, chumbo, estanho etc.) seria como se 82.680 toneladas destes produtos fossem descartadas por ano (FORTI *et al.*, 2020).

Quando se pensa em descarbonização do planeta, a estimativa, segundo o IEA (2021), é que em 2050, em um cenário de emissão neutra de gases de efeito estufa, tenhamos cerca de 14.458 GW de capacidade instalada, conforme observado na Gráfico 10, ou seja, teríamos quantidades superiores a 3 vezes os números atuais projetados, o que torna ainda mais necessário a tomada de medidas por parte de governos e entidades competentes.

**Gráfico 10** - Capacidade de geração elétrica instalada até 2050, em cenário de emissão neutra



As demandas crescentes por energia de origem fotovoltaica provocarão, sem dúvidas, incremento da geração mundial de resíduos eletroeletrônicos provenientes destes sistemas. Face a esta condição, caberá às autoridades dos países, entidades envolvidas e pesquisadores no assunto, em geral, criarem mecanismos para viabilizar a redução do uso de matérias primas, o reaproveitamento ou reuso e a reciclagem, principalmente, dos módulos fotovoltaicos. Mecanismos voltados para a redução de matérias primas irão contribuir para um melhor aproveitamento de materiais escassos na natureza com a redução das emissões de gases de efeito estufa, conforme relatado por Yue *et al.* (2014), uma vez que menos energia é exigida para se obter materiais secundários, ao invés de matérias prima, exigindo-se, portanto, menos dos recursos do planeta. Diante da situação, surge a oportunidade para o desenvolvimento de um mercado potencial associado ao transporte, acondicionamento, reparo, reutilização etc. de sistemas fotovoltaicos no

fim de sua vida útil. O desenvolvimento de plantas e processos mais eficientes e capazes de ampliar a capacidade de processamento e as quantidades de produtos a serem segregados vêm a ser uma exigência para este novo mercado.

Segundo Komoto e Lee (2018), as tratativas recentes para a gestão do fim de vida útil dos módulos fotovoltaicos, na grande maioria dos países, ainda necessitam de ações tecnológicas e, também, regulatórias e que devem ser bem integradas para que possam surtir os efeitos esperados. Com exceção da Europa, as demais regiões do mundo ainda estão bastante incipientes no que tange este tema, haja vista que na maioria das regiões os resíduos fotovoltaicos são tratados ou como resíduos sólidos comuns ou resíduo eletrônico normal ou mesmo nem há tratativas.

O desenvolvimento de soluções e processos técnicos, sem sombra de dúvidas, será essencial para a adequada tratativa dos potenciais problemas que surgirão no fim do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos, no entanto; não é uma condição suficiente. Será necessário também o desenvolvimento e implementação de mecanismos políticos e regulatórios em todas as fases do ciclo de vida, de forma a preparar, fomentar e incentivar o desenvolvimento da indústria de tratamento adequado dos RSFV. Para Sharma *et al.* (2019), a implementação de processos eficientes deve ser associada às estruturas regulatórias adequadas, as quais devem incluir técnicas de gestão do ciclo de vida do produto além de tecnologias de reciclagem dos RSFV para a recuperação dos materiais. Ações neste sentido já começam a surgir em algumas regiões, como é o caso da Europa, com sua diretiva WEEE, que inclusive já foi inserida no arcabouço legal de Alemanha e Reino Unido. Movimentos nesse sentido, também já são observados em alguns estados dos Estados Unidos da América e mais timidamente no Japão.

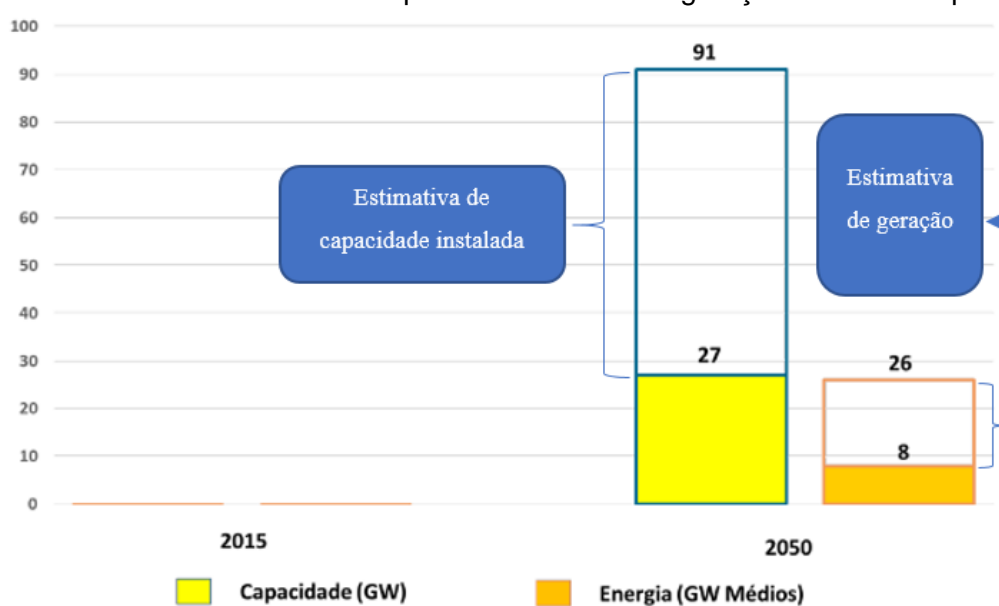
### **1.3 A questão dos resíduos de sistemas fotovoltaicos no Brasil**

Estimativas futuras, principalmente em se tratando de Brasil, quando o tema é referido a algum aspecto socioeconômico, nem sempre são precisas em suas previsões. Como exemplo, observa-se as estimativas sobre a capacidade instalada em geração distribuída de usinas fotovoltaicas no Brasil, onde se alcançou em 2020 o que seria esperado para 2024. Fatos como questões políticas, aspectos técnicos, ambientais e econômicos, crises financeiras ou mesmo as crises sanitárias acabam interferindo significativamente nas estimativas futuras. Por motivos como estes, o mais

prudente é mostrar uma faixa de domínio onde os valores estimados possam vir a ocorrer.

Segundo estimativas do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) da Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas (BRASIL, 2020), em 2050, dependendo das restrições, o Brasil atingirá entre 27 e 90 GW de capacidade instalada de geração solar fotovoltaica (Gráfico 11), somente em geração centralizada, ou seja, sem levar em consideração as usinas instaladas em residências ou pontos comerciais.

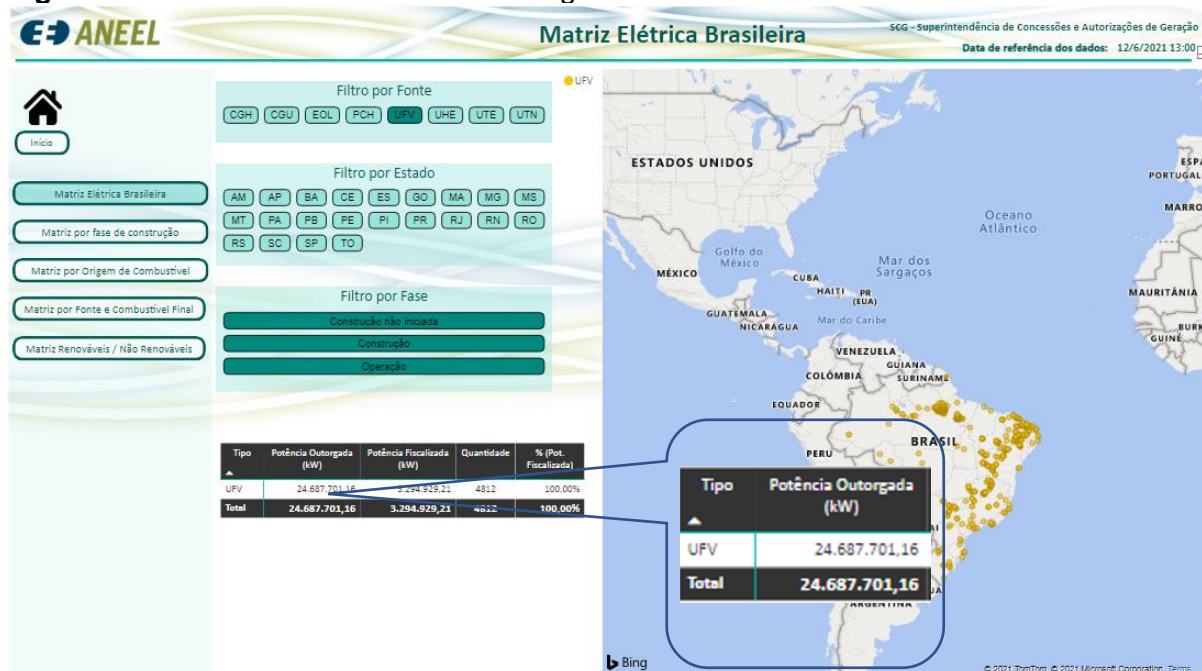
**Gráfico 11** - Estimativas de capacidade instalada e geração fotovoltaica para 2050



Fonte: PNE 2050 (2020)

O problema reside no fato que já consta no sítio da ANEEL, conforme observa-se na Figura 5, que existem até data deste estudo (junho/2021), cerca de 24.687.701,16 kW de potência outorgada. Este valor já é bem próximo do cenário mais pessimista estimada pela EPE para o ano de 2050. Fazendo-se uma estimativa pontual da quantidade de sistemas outorgados até junho de 2021, para termos uma ideia de grandeza da quantidade de resíduos que estes sistemas poderão gerar em um intervalo futuro de 25 anos à frente, e se considerarmos que os módulos fotovoltaicas possuam potência média de 400 Wp (valores maiores são encontrados no mercado) e considerando cada módulo pesando em média 22kg, estima-se 1.357.823,564 toneladas de resíduos a serem descartados após o fim de vida útil desses sistema.

Figura 5 - Volume atual de sistemas outorgados



Fonte: ANEEL (2021)

Consta no PNE 2050 da EPE preocupação com o descarte futuro dos RSFV, conforme verifica-se no quadro de desafios e recomendações referente à energia solar fotovoltaica, Figura 6, para a geração fotovoltaica (BRASIL, 2020). É possível observar, na coluna referente às recomendações, o endereçamento das regulações, ou seja, será necessário implementar mecanismos que possibilitarão a execução de ações que promovam a redução, reutilização, reciclagem dos produtos RSFV. Será indispensável a criação de parcerias entre o poder público e sociedade para que todas as ações sejam bem implementadas.

Dentro da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/10, será também necessário considerar, pelos entes federativos, nos planos de resíduos sólidos, a questão do descarte dos RSFV gerados por produtores residenciais, comerciais e produtores centralizados. Na lei 12.305/10 são considerados planos de resíduos sólidos (BRASIL, 2010):

Art. 14. São planos de resíduos sólidos:

- I - O Plano Nacional de Resíduos Sólidos;
- II - Os planos estaduais de resíduos sólidos;
- III - os planos microrregionais de resíduos sólidos e os planos de resíduos sólidos de regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas;
- IV - Os planos intermunicipais de resíduos sólidos;
- V - Os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos;
- VI - Os planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

**Figura 6** - Quadro de desafios e recomendações PNE 2050

Desafios	Recomendações	
	2020 - 2030	2030 - 2040
<i>Preparar-se para uma matriz com grande percentual de geração variável não controlável</i>	<i>Desenvolver novas ferramentas, tecnologias e modelos de negócios para previsão da geração solar e gestão da operação do sistema elétrico</i>	
	<i>Incorporar melhorias aos estudos socioambientais desenvolvidos para projetos de geração solar em uma perspectiva de questões ambientais decorrentes de efeitos cumulativos</i>	
	<i>Integrar as perspectivas de expansão da geração solar e o planejamento da expansão da transmissão</i>	
<i>Lidar com o descarte e reciclagem de equipamentos</i>	<i>Articular com diferentes atores governamentais e setoriais para endereçar a regulação relativa à reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico.</i>	

Fonte: MME-EPE (2020)

A criação de uma regulamentação específica para a gestão do ciclo de vida de sistemas de geração fotovoltaicos e, conseqüentemente, para os REEE se torna mister e muito provavelmente ter-se-ia um novo marco legal na evolução histórica das principais leis ambientais do país, assim como ocorreu com as leis 6935/81 (Política nacional do meio ambiente); 9605/98 (Lei de crimes ambientais) e 12305/10 (Política nacional de resíduos sólidos). Paralelamente à evolução normativa brasileira, medidas e boas práticas, já aplicadas em outros países, deverão, então, ser adaptadas para à realidade do Brasil.

Diante dos fatos e argumentas expostos, se torna clara a visão que o Brasil deverá, em algum momento, seguir o mesmo caminho que algumas nações como Alemanha e Reino Unido estão tomando. No entanto, qualquer ação neste sentido deverá estar em consonância com a atual Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.304/2010) e com os demais mandamentos pertinentes do arcabouço legal brasileiro. Portanto, se tornará necessário discussões e proposituras futuras para a implantação ou adequação de modelos e padrões aplicados em outras regiões para a realidade brasileira; neste sentido, o trabalho ora apresentado tem o objetivo principal de elencar os desafios e as principais ações atualmente executadas nos países mais avançados no tema gestão do fim de vida útil de sistemas fotovoltaicos e avaliar estes modelos a luz da PNRS para uma proposta de aplicação futura no Brasil.

#### 1.4 Metodologia

O conteúdo desenvolvido neste trabalho, com a finalidade de aprofundar o conhecimento da questão dos resíduos fotovoltaicos, partiu de uma pesquisa de

caráter básico e estratégica, a qual pode ser classificada como teórico exploratória, uma vez que parte da análise de referenciais teóricos e documental do tema estudado. Através de uma abordagem qualitativa, as informações contidas em estudos científicos, leis e decretos-lei, documentos e relatórios de órgãos públicos e privados nacionais (ANEEL, ABRELPE, EPE, LEI 12.305/10) e internacionais (Banco Mundial, EIA, IEA IRENA, ONU, UE, WEEE) são analisadas através de método hipotético-dedutivo. O trabalho estabelece uma correlação entre energia e ambiente, voltadas para a questão da geração de energia elétrica a partir da fonte solar fotovoltaica tendo como cenário principal o debate sobre a questão da produção dos resíduos gerados por sistemas fotovoltaicos em fim de vida útil, à luz do arcabouço regulatório brasileiro.



## 2 ENERGIA, SOCIEDADE E OS RESÍDUOS

A dependência dos seres humanos por fontes energéticas é um fato que acompanha a humanidade ao longo de toda sua existência e não poderia ser diferente, o consumo de energia pelos seres humanos está ligado diretamente ao desenvolvimento e evolução de sua espécie. É de conhecimento, que remontam a tempos pré-históricos, que os ancestrais do homem já utilizavam o fogo como fonte de energia para se aquecerem e se protegerem de outras espécies ameaçadoras (CARVALHO, 2014; BOWMAN *et al.*, 2009). Ao longo dos séculos a humanidade utilizou a lenha, proveniente de florestas naturais, como fonte de energia associado a outros usos.

No início, devido às baixas densidades populacionais, o próprio ciclo natural se responsabilizava por regenerar e repor as florestas (CARVALHO, 2014), no entanto, com o aumento das populações, muitas florestas foram dizimadas em várias regiões do planeta. Óleo de animais também foram bastante utilizados como fonte de energia, é o caso do óleo de baleia que, de certa forma, também associado a outros usos, contribuiu para diminuição desta espécie marinha (COMERLATO, 2010). O uso de tração animal, principalmente nas grandes cidades do mundo, causava caos para os serviços públicos de limpeza urbana, o mau cheiro provocado por fezes e urinas de animais (Figura 7) eram bastante fortes e era caso de saúde pública (DEURSEN, 2019).

O advento das máquinas a vapor e do uso do petróleo como combustível contribuíram para a solução do problema dos dejetos oriundos da tração animal nas grandes cidades. A então solução provocou um efeito a longo prazo na escala humana. O uso demasiado dos combustíveis fósseis é hoje considerado o maior responsável pelas alterações climáticas no planeta (CETESB, 2021).

**Figura 7 - Dejetos de animais nas ruas de Londres em 1893**



**MORTON STREET, CORNER OF BEDFORD, LOOKING TOWARD BLEECKER STREET,  
MARCH 17, 1893.**

Fonte: Deursen, Superinteressante (2016)

Outras formas de energia, consideradas mais limpas também apresentam suas peculiaridades ambientais negativas, no caso específico da energia proveniente de centrais hidrelétricas, as grandes áreas alagadas provocaram e provocam ainda grandes discursões sobre o tema; a energia nuclear, por sua vez, apesar de possuir grande densidade energética ( $\text{kWh/m}^2$ ), apresenta os problemas dos resíduos atômicos altamente perigoso, a questão do descarte das águas de resfriamento e o próprio risco de desastre nuclear. Na vanguarda das novas tecnologias para aproveitamento de energia, assim como a fotovoltaica, temos a energia eólica, que, no entanto, também já há bastante discussão sobre os resíduos dos aerogeradores descomissionados, em alguns lugares já é possível observar grandes quantidades de pás descartadas (Figura 8) e sem uso (LIU; BARLOW, 2017).

**Figura 8** - Descarte de pás de rotores eólicos



Fonte: Mail News (2020)

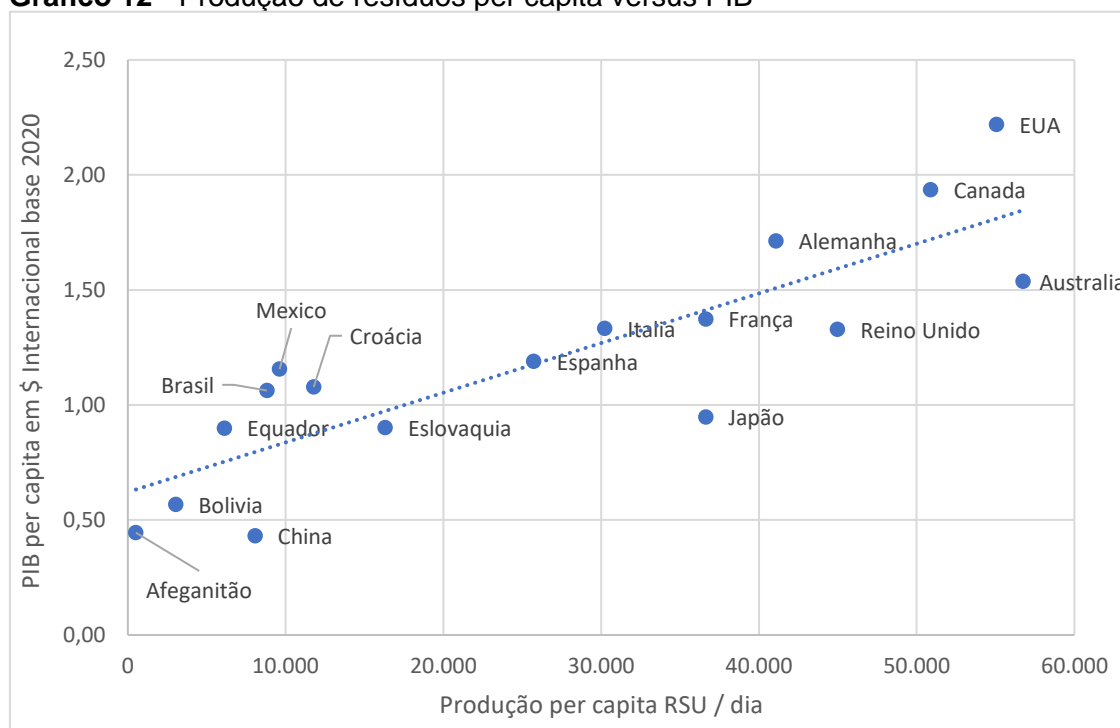
## 2.1 Os resíduos sólidos

As últimas décadas de nossa sociedade vêm sendo fortemente marcadas por um processo puramente antrópico, o qual vai deixar sua impressão ao longo de várias gerações, e caso não se encontrem alternativas viáveis de como contornar o problema, o planeta será levado a um verdadeiro teste de resistência e capacidade, condenado as gerações futuras da possibilidade de desfrutar de um ambiente agradável e saudável que, outrora, gerações passadas gozaram, o lixo nas suas mais abrangentes classificações, porém aqui, mais especificamente, refere-se aos resíduos sólidos.

O processo de aceleração da produção de resíduos sólidos, o qual o planeta vem “sofrendo”, alcançou o patamar de 3 vezes o crescimento populacional nessas últimas décadas de nossa contemporaneidade (BRASIL, 2014). Dados do banco mundial, conforme Kaza *et al.* (2018), mostram que anualmente são produzidos 2,1 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), estabelecendo uma média de 0,74 kg/dia por habitante. Esses números variam bastante dependendo da região, podendo oscilar de 0,11 kg/dia-habitante, em regiões menos favorecidas ou

com menor desenvolvimento econômico, a 4,54 kg/dia-habitante, em regiões com mais altas rendas. Em geral, essas médias crescem a taxas muito parecidas ao ritmo de crescimento do PIB (Gráfico 12), ou seja, níveis mais elevados de riqueza produzem maiores níveis de produção de RSU, Kaza *et al.* (2018)

**Gráfico 12 - Produção de resíduos per capita versus PIB**



Fonte: Banco Mundial, adaptado pelo autor (2020)

Ainda segundo Kaza *et al.* (2018), os países mais ricos com cerca de, apenas, 16% da população mundial respondem por 34% de toda produção global de RSU. Outra característica importante é que ocorre uma transformação no perfil desses resíduos sólidos produzidos. Percentualmente, ocorre uma redução na geração de resíduos com características mais orgânicas e um aumento na geração de resíduos com maiores percentuais de elementos metálicos, plásticos, borrachas e papéis.

Previsões da Organização das Nações Unidas (ONU, 2020) e do Banco Mundial indicam que em 2050 a população mundial alcançará o patamar de 9 bilhões de habitantes e que serão gerados um volume na ordem de 4 bilhões de toneladas métricas de lixo urbano por ano, e este não é o único empecilho. O problema é que, ainda, grande parte dos resíduos sólidos, cerca de 800 milhões de toneladas por ano, são descartados de forma inadequada em lixões ou aterros inadequados.

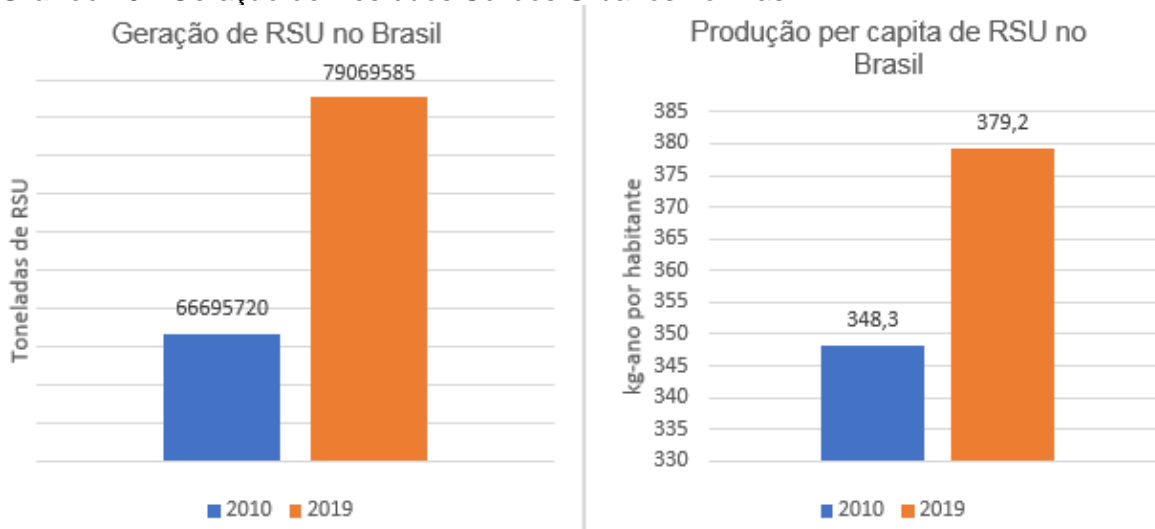
Segundo o Conselho de Pesquisa em Tecnologia de Geração de Energia

a partir de Resíduos dos Estados Unidos, estima-se que um metro quadrado de terreno é desperdiçado para sempre, para cada dez toneladas de lixo aterrado (BRASIL, 2014). Outro fator crítico é o custo financeiro e ambiental que se tem que pagar por questões relacionados ao despojamento dos resíduos sólidos. Acrescenta-se a estes itens o fato do aumento dos riscos à saúde pública e dos riscos ambientais como a poluição do ar, através da queima inadequada ou mesmo a poluição dos cursos e lençóis d'água, além de inviabilizar processos de coleta de materiais recicláveis e muita das vezes raros na natureza, como é o caso de elementos químicos metálicos presentes nos resíduos de características eletroeletrônicas (LUO et al., 2009; XU *et al.*, 2018).

Atualmente, de acordo com a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), apenas metade da população mundial é atendida por coleta regular de resíduos sólidos. As regiões mais carentes, socialmente menos desenvolvidas, do planeta são as áreas onde se têm maiores índices de deficiência na coleta de lixo urbano, e a ISWA estima que seria necessário um investimento anual na casa de US\$ 40 bilhões (cerca de R\$ 216 bilhões, base novembro de 2021) apenas para garantir que o lixo nessas regiões seja regularmente recolhido. Segundo o “Guia de Estratégias Nacionais para o Manejo do Lixo: mudando de desafios para oportunidades”, elaborado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2013), essa situação, além de prejudicar a economia, representa sérios riscos à saúde dos seres humanos e ao meio ambiente.

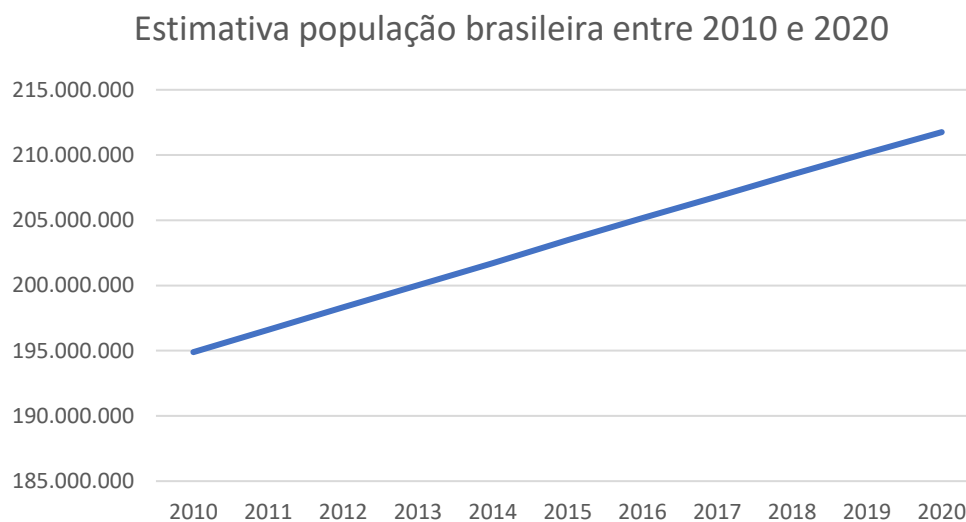
## **2.2 A questão dos resíduos sólidos no Brasil**

No Brasil, os dados não divergem significativamente, em perfil, dos números encontrados nos demais países. Segundo a (Associação Brasileira de Empresa de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) entidade que reúne as empresas do setor de limpeza urbana, em seu relatório anual (ABRELPE, 2020) o Brasil produziu, em 2020, cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, o que mostra um aumento de aproximadamente 17,9% em relação a 2010, quando foram produzidos cerca de 67 milhões de toneladas de resíduos sólidos, conforme observado no Gráfico 13:

**Gráfico 13 - Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**

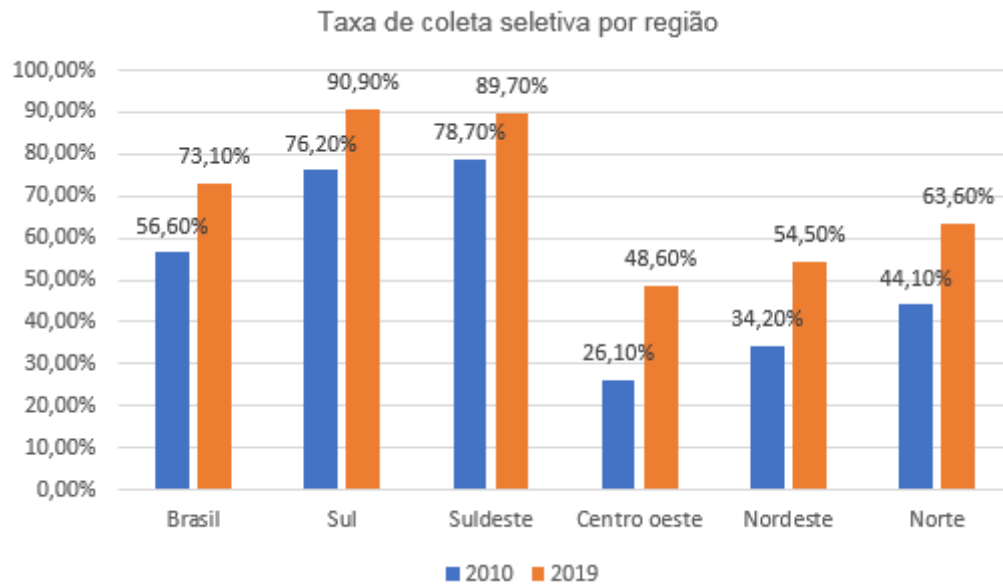
Fonte: Autor, dados ABRELPE (2020)

Neste mesmo período, o crescimento da população foi de cerca de 8,9%, evidenciando que a taxa de produção de resíduos sólidos no Brasil foi, praticamente, o dobro da taxa de crescimento da população em um período de 10 anos (Gráfico 14).

**Gráfico 14 - Estimativa populacional brasileira**

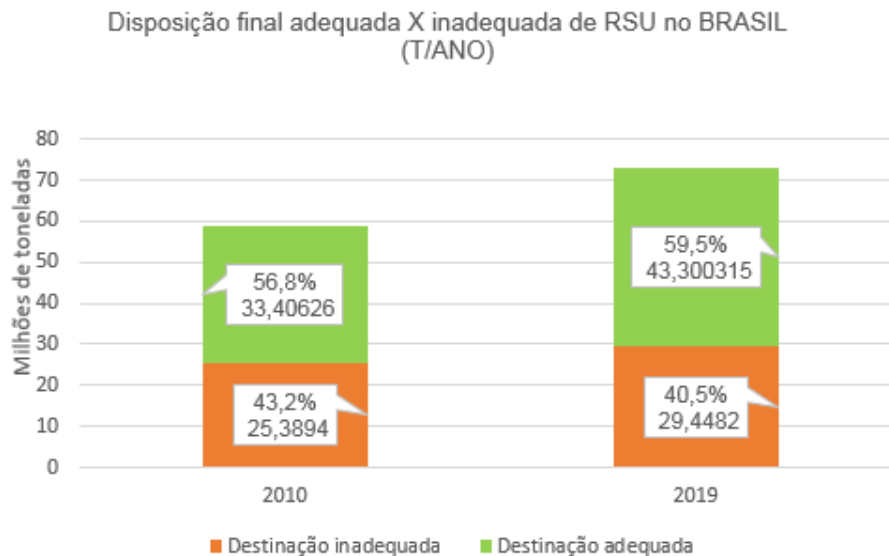
Fonte: Elaborado pelo autor, dados IBGE (2020)

Em relação aos sistemas de coleta, ao longo dos últimos anos, percebeu-se um aumento significativo nos índices de coleta seletiva (Gráfico 15), em todas as regiões do país. No entanto, ainda é bastante perceptível as disparidades acentuadas entre regiões, principalmente quando comparadas as regiões sul e sudeste, mais bem desenvolvidas, com as demais regiões do Brasil.

**Gráfico 15 - Taxa de coleta seletiva por região**

Fonte: Autor, dados ABRELPE (2020)

No quesito destinação adequada, em 10 anos, houve uma melhora, ainda bastante tímida, quando se fala em valores percentuais, apesar de o Brasil ter aumentado em quase 1 milhão de toneladas por ano sua capacidade de destinação adequada de RSU, o Brasil saiu de um percentual de 56,8% de RSU corretamente destinados para cerca de 59,5% do total gerado conforme observado no Gráfico 16.

**Gráfico 16 - Disposição final adequada X inadequada de RSU no BRASIL (T/ANO)**

Fonte: Autor, dados ABRELPE (2020)

Os dados mostrados evidenciam que ainda é necessário evoluir bastante em todos os aspectos, quando o assunto é resíduo sólido, uma vez que Resíduos Sólidos Urbanos são apenas uma parcela de todo o volume dos diversos tipos de resíduos sólidos gerados no Brasil, conforme dispõem o Art. 13, inciso I, alíneas a, b, c, d, e, f, g, h, i, f, j, k; da lei 12.305/10, a famosa Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I - Quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios. (BRASIL, 2010).

Objetivando estabelecer formas de permitir a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, através da logística reversa, e visando estabelecer a prática do consumo sustentável, reunindo fabricantes, importadores, comerciantes, distribuidores e consumidor final a mesma lei 12.305/12 estabeleceu como instrumento de sua Política Nacional de Resíduos Sólidos os acordos setoriais, nos termos do art. 3º, inciso I.

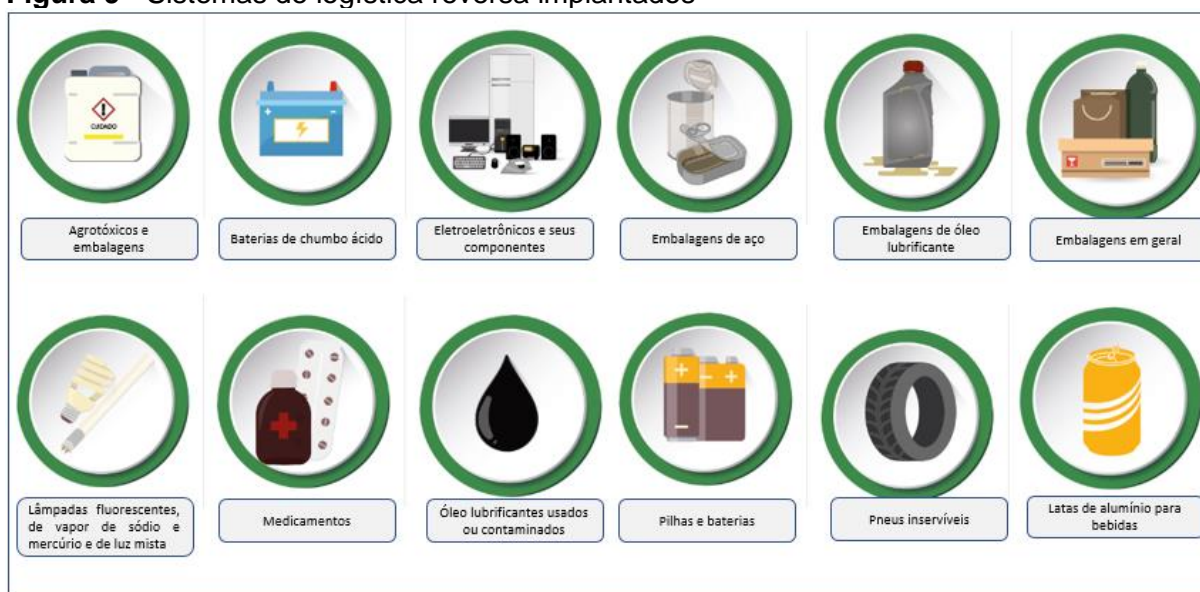
[...] acordo setorial: ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes,



tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto (BRASIL, 2010).

Atualmente, estão estabelecidos uma série de acordos setoriais que permitem o recolhimento de uma série de produtos após seus ciclos de vida útil através de processos de logística reversa (Figura 9) tais como: pilhas e baterias, latas de alumínio para bebidas, pneus, embalagens de aço, embalagens de óleo lubrificantes, medicamentos, baterias de chumbo ácido, eletroeletrônicos e seus componentes etc., conforme descritos no site do Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) do Ministério do Meio Ambiente (SINIR, 2019).

**Figura 9** - Sistemas de logística reversa implantados



Fonte: SINIR, adaptado pelo autor (2021)

### 2.3 Resíduos de Produtos Eletroeletrônicos

Em relação aos resíduos eletroeletrônicos, estes vêm se tornando um enorme desafio devido às suas características físico-químicas, potencial de danos ao ambiente e à saúde dos seres vivos, recuperação de materiais raros e ao grande volume que vem sendo gerado a cada ano, que cresce a taxas maiores que o crescimento populacional, Forti *et al.* (2020), Kaza (2018).

Resíduos eletroeletrônicos (Figura 10) são todos produtos e seus componentes de natureza eletroeletrônica, os quais são compostos por uma variedade de materiais que foram descartados como resíduos após o fim de sua vida

útil ou depois que se tornaram obsoletos.

A instrução normativa 13 do IBAMA, classifica os equipamentos eletroeletrônicos como geradores de resíduos perigosos. No entanto, é notório que esses tipos de produtos tornam a vida moderna mais conveniente e cada vez mais fazem parte da vida das pessoas nos mais variados setores da sociedade moderna. Anualmente, o volume de resíduos de natureza eletroeletrônica vem aumentando, segundo dados do relatório *Global E-waste Monitor 2020* (FORTI *et al.*, 2020) e *Future E-waste Scenarios* (PARUJULY *et al.*, 2019) foram gerados cerca de 53,6 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos em todo o mundo no ano de 2019.

**Figura 10** - Lixo eletroeletrônico



Fonte: *Global E-waste monitor* (2020)

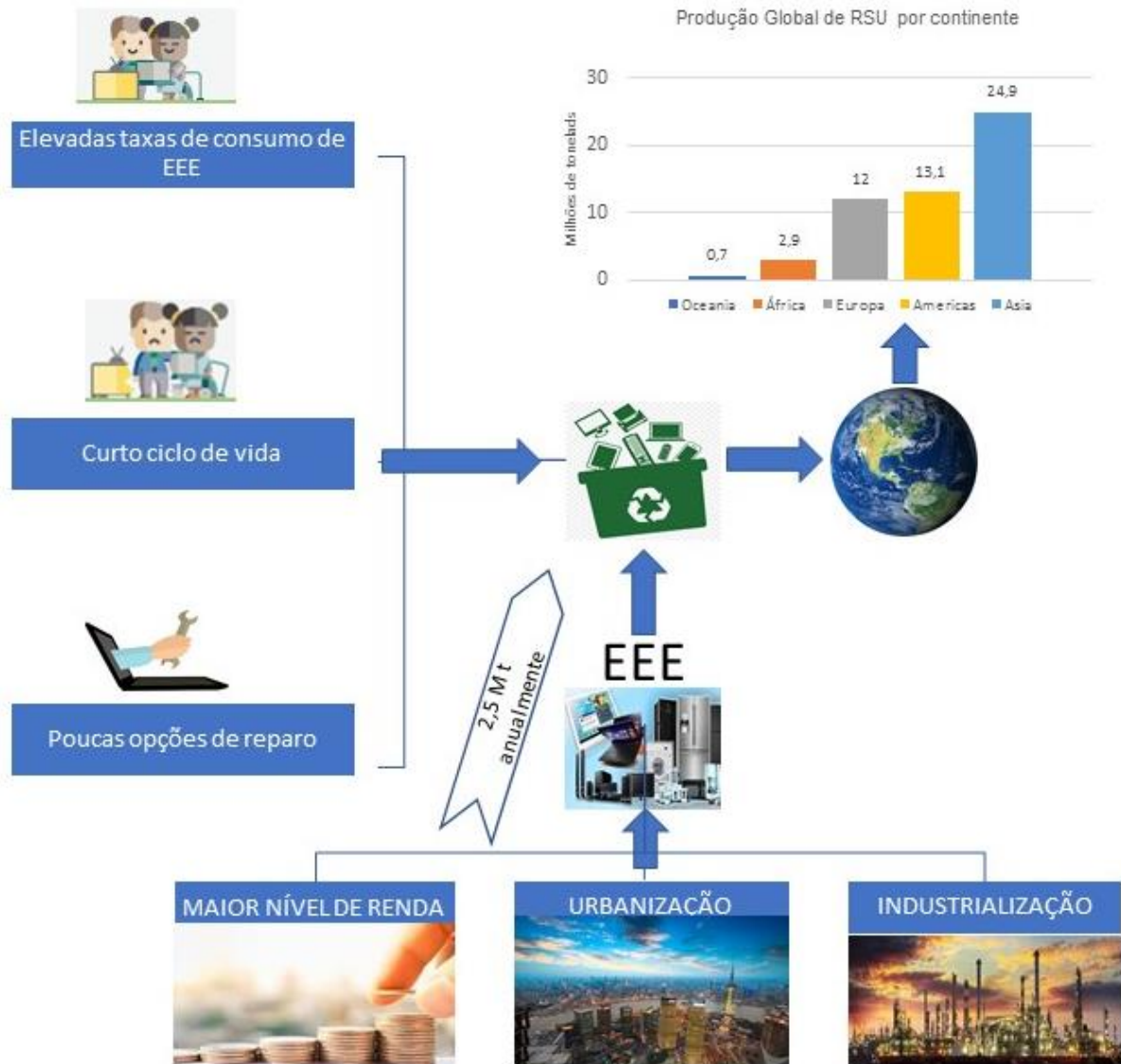
Intimamente relacionado ao contínuo desenvolvimento e a melhoria nos padrões de vida da sociedade moderna (urbanização e industrialização) os produtos eletroeletrônicos tendem a crescer ainda mais seu volume de produção à medida que as pessoas vão ascendendo socialmente. A previsão é de se alcançar o patamar de 74,7 milhões de toneladas até 2030, Forti *et al.* (2020).

Estes produtos eletroeletrônicos e seus componentes, após o seu ciclo de vida útil, são transformados em resíduos contendo materiais perigosos e raros que

podem gerar valores consideráveis com a comercialização desses materiais recuperáveis. A taxa de crescimento do fluxo de resíduos de origem eletroeletrônica é de cerca de 2,5 milhões de toneladas ano, estabelecendo uma média de 7,3 kg ano per capita. Motivos como altas taxas de consumo, curtos ciclos de vida dos produtos e produtos com baixíssimas possibilidades de manutenção ou reparo estão entre as principais causas do aumento do volume de resíduos eletroeletrônicos no mundo.

O continente asiático foi o maior gerador de resíduos eletrônicos em 2019 com um volume de 24,9 milhões de toneladas. A África foi o continente com o menor volume gerado com cerca de 700.000 toneladas geradas em 2019. Enquanto a Ásia foi o maior gerador no período supracitado, a Europa obteve a maior taxa per capita no mundo com 16,2 kg - ano por habitante; África, também, é o continente com a menor geração per capita com 2,5 kg - ano por habitante. A Figura 11, adaptada do relatório *E-waste monitor 2020* mostra de forma resumida as informações e dados apresentados.

**Figura 11** - Ilustração resumida do processo de geração de REEs



Fonte: Autor, adaptado de *Global E-waste monitor* (2020)

Os REEE contêm vários elementos tóxicos ou substâncias perigosas, dentre eles mercúrio, retardadores de chama bromados e clorofluorcarbonos (CFC), ou hidroclorofluorcarbonetos (HCFC), conforme Luo *et al.* (2009). Tratamento inadequado dos REEE implica em riscos à saúde humana e riscos ao meio ambiente contribuindo, até mesmo, para o aquecimento global, uma vez que os materiais não sendo reciclados, estes não poderão substituir as matérias primas necessárias para novos produtos, aumentando assim a emissão de gases de efeito estufa. Apenas como retrato, só de quantidade equivalente de CO<sub>2</sub> foram lançados na atmosfera, em 2019, cerca de 98 milhões de toneladas de gases provenientes de geladeiras e aparelhos de ar-condicionado descartados inadequadamente, Forti *et al.* (2020). A

contribuição para redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente com a reciclagem de alumínio, cobre e ferro foram de 15M toneladas, à taxa de reciclagem do período.

No plano econômico-financeiro, 17,4% de REEE foram reciclados e devidamente documentados, recuperando um volume equivalente a \$ 10 bilhões, só com a recuperação de matérias primas desses resíduos, quando comparados aos valores das matérias primas bruta, as quais correspondem a um valor de \$ 57 bilhões. Para sintetizar os números apresentados, é mostrado no quadro da Tabela 2 um resumo dos dados apresentados a partir do relatório da *Global E-Waste Monitor 2020*.

**Tabela 2** - Quadro Resumo dos dados de REEE, por continente.

	REE Gerado (Mt)	Per capita (kg/ano)	% de reciclagem	Total Reciclados (Mt)	Total não reciclados, não documentados	% não reciclados, não documentados
Américas	13,1	13,6	9,4	1,2	11,9	90,6
África	2,9	2,5	0,9	0,03	2,9	99,1
Ásia	24,9	5,6	11,7	2,9	22,0	88,3
Europa	12	16,2	42,5	5,1	6,9	57,5
Oceania	0,7	16,1	8,8	0,1	0,6	91,2
<b>TOTAL</b>	<b>53,6</b>	<b>7,3</b>	<b>17,4</b>	<b>9,3</b>	<b>44,3</b>	<b>82,6</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

## 2.4 Acordo Setorial Brasileiro para Resíduos Eletroeletrônicos

No caso específico do Brasil, os dados são bastante tímidos. A estimativa é que foram gerados em 2019, aproximadamente 2,143 milhões de toneladas de REEE segundo Forti *et al.* (2020, p. 106), a média per capita ficou em torno de 10,2 kg, uma média superior à média mundial que é de 7,3 kg per capita. Lembrando que a média de geração total de RSU neste ano foi de 379,2 kg per capita, ou seja, o volume gerado de REEE corresponde a 2,68% de todo o volume de RSU gerado no Brasil, no entanto, conforme explicado anteriormente, a tendência é este número aumentar, conforme as pessoas ascendem socialmente. Fato preocupante, é na verdade a falta de dados precisos sobre a coleta e reciclagem de REEE no Brasil. Oficialmente, no Brasil, o instrumento que viabiliza o retorno aos fabricantes ou importadores dos produtos eletroeletrônicos descartados é o sistema de logística reversa viabilizado via Acordo Setorial para produtos eletroeletrônicos.

Nos termos do art. 3º, Inciso XII da lei 12.305 de 2 de agosto de 2010,

logística reversa é:

[...] instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

O Acordo Setorial para implantação da logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes tem como partes do acordo o Ministério de Meio Ambiente; a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) (Entidade que representa fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos elencados em lista anexa ao acordo); Associação Brasileira de Produtos e Serviços de Tecnologia da Informação (ADRADISTI); Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação (ASSEPRO); Gestora para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônico Nacional (GREEN ELETRON).

Todos os fabricantes e importadores de produtos eletroeletrônicos que fazem parte do rol de produtos listados no acordo setorial são obrigados a estruturarem sistemas de logística reversa para seus produtos, após uso, por parte dos consumidores de forma independente do sistema de limpeza pública urbana.

Assim como existe um rol explícito dos produtos eletroeletrônicos que fazem parte da lista do Acordo Setorial, existe também uma relação de tipos de produtos eletroeletrônicos que não fazem parte do Acordo Setorial supracitado (SINIR, 2019). Esta relação é constituída basicamente de produtos eletroeletrônicos de origem ou aplicação em serviços de saúde (incluindo-se os utilizados em residência), os de uso corporativos e os de uso profissional, e grandes volumes originários de grandes geradores. Todos estes resíduos de produtos eletroeletrônicos e seus componentes podem, através de contrato entre as partes envolvidas, estabelecer processo de logística reversa desses produtos. Acrescenta-se a essa relação pilhas, baterias, os quais já possuem seu próprio acordo setorial e outros componentes eletroeletrônicos não pertencentes ao rol do acordo setorial de produtos eletroeletrônicos.

## **2.5 O risco potencial dos resíduos de sistemas de geração fotovoltaicos**

Os dados apresentados sobre a geração de REEE no Brasil e o rol de

produtos listados no Acordo Setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes possuem uma observação importante em comum: não estão incluídos nos números nenhum dado a respeito dos resíduos gerados a partir do descarte de sistemas ou módulos de geração de energia de fonte fotovoltaica. Algumas razões para esta realidade podem ser associadas à quantidade, ainda, inexpressiva de produtos originários de geradores fotovoltaicos, haja vista que, de forma regulamentada, o Brasil apenas iniciou sua trajetória, possibilitando as pessoas comuns e pessoas físicas possuírem seus sistemas próprios de geração de energia elétrica a partir da fonte fotovoltaica, com o advento da resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) REN 482 de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012). Uma vez que a perspectiva de vida útil média desses sistemas é de 25 anos, é provável que este fato seja uma forma de explicar a falta de preocupação, em relação a esta questão, por parte dos fabricantes, importadores, grande maioria do público e das autoridades responsáveis.

No entanto, regiões que estão na vanguarda no uso da energia proveniente de sistemas fotovoltaicos já apresentam certo grau de preocupação e ações começam a serem desenvolvidas e implementadas, a União Europeia, por exemplo, inseriu os resíduos de produtos de origem fotovoltaica no rol dos resíduos de produtos eletroeletrônicos (UNIÃO EUROPEIA, 2012) presentes em uma diretiva dedicada ao tema REEE. Países como Alemanha e Reino Unido transformaram em lei a diretiva da União Europeia. Conforme, Miranda *et al.* (2019), na Alemanha, fabricantes e fornecedores de módulos FV devem ser registrados pela lei local de resíduos elétricos e eletrônicos (ELEKTROG, 2015), antes de terem seus produtos vendidos e no fim de vida útil desses sistemas os módulos devem ser recolhidos pelos fabricantes para tratamento e reciclagem, postura semelhante é adotada no Reino Unido.

Nos Estados Unidos da América, os estados da Califórnia e Washington tiveram as primeiras iniciativas no sentido de adotarem medidas em relação aos resíduos de sistemas fotovoltaicos. A Califórnia classifica esses resíduos na mesma categoria de pesticidas, lâmpadas, baterias, entre outros. O estado de Washington aprovou lei (WASHINGTON LEGISLATURE, 2017) que autoriza o sistema de logística reversa e programa de reciclagem para a gestão de fim de vida dos módulos.

### 3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM FIM DE VIDA ÚTIL E SEUS RESÍDUOS GERADOS

Para descrever com maior grau de certeza os tipos de resíduos gerados por sistemas de geração fotovoltaica é necessário, antes de tudo, saber qual o tipo de sistema se *on grid* (conectado à rede) ou *off grid* (não conectado à rede), uma vez que os sistemas *off grid* utilizam na maioria das vezes baterias como elementos integrantes do sistema, já aqueles não há a necessidade de uso de baterias. De uma forma generalizada os resíduos fotovoltaicos gerados ao fim da vida útil de um sistema gerador fotovoltaico são: Vidro, alumínio da estrutura, silício, EVA (polietileno-coacetato de vinila) e uma quantidade de metais preciosos ou raros que uma vez recuperados apresentam considerável valor econômico.

#### 3.1 Características conforme geração

Os tipos de elementos químicos presentes nos módulos mudam conforme a geração dos módulos. Conforme (PINHO; GALDINO, 2014), basicamente, existem 3 gerações de módulos, módulos de primeira geração, segunda geração e atualmente, a terceira geração de módulos. A descrição dos componentes e elementos constituintes de cada geração de módulos fotovoltaicos é demonstrada a seguir:

A primeira geração de módulos fotovoltaicos que surgiu no mercado é composta, basicamente, por dois subgrupos de silício cristalino (c-Si), que são silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si). Sendo produzidos a partir de fatias de um único cristal, os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) são bastante eficientes, no entanto, com preço atual no mercado um pouco mais caro, quando comparados aos módulos policristalinos.

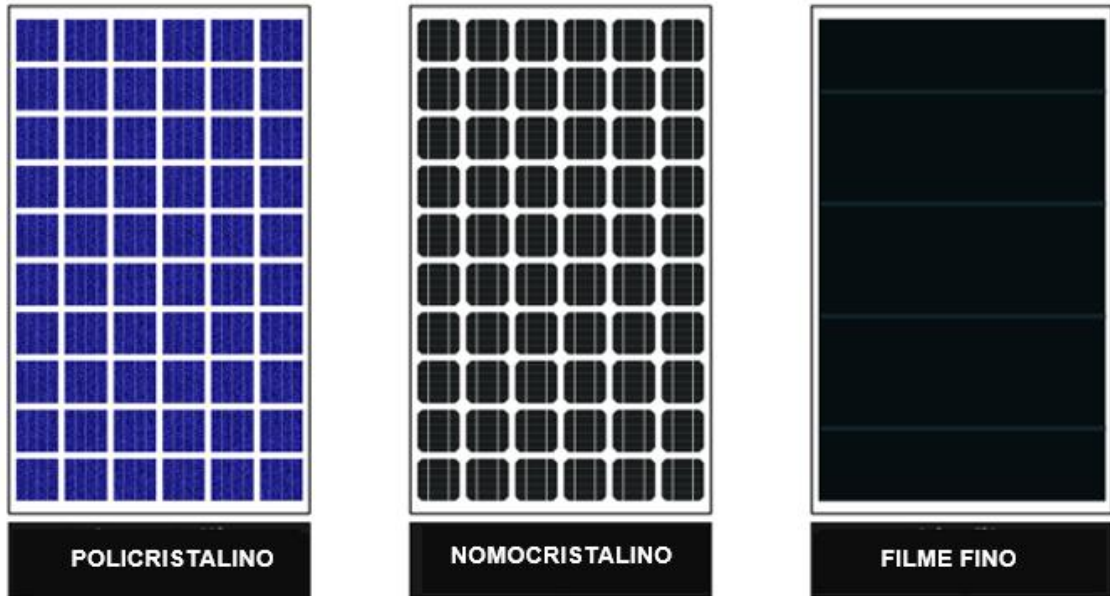
Por outro lado, em função de seu modo construtivo, que utiliza vários cristais, em vez de ser formado por um único cristal, os módulos fotovoltaicos de silício policristalino (p-Si) possuem uma eficiência menor que a do silício monocristalino. Por outro lado, o custo dos módulos de silício policristalino é mais baixo, quando comparados aos módulos monocristalino. Ambos os módulos são retratados na Figura 12 a seguir.

A segunda geração de módulos fotovoltaicos é caracterizada pela formação de filmes fino de materiais a base de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe),



seleneto de cádmio (CdS), arseneto de gálio (GaAs), cádmio-índio-gálio-selênio (GIGS) e cádmio-índio-selênio (CIS).

**Figura 12** - Tipos de módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de Solarsena (2021)

Em relação à terceira geração de módulos fotovoltaicos, módulos solares sensibilizados por corantes orgânicos ou painéis solares híbridos, ainda está em desenvolvimento não apresentando, ainda, preços competitivos no mercado.

A Tabela 3 mostra a composição em massa de todos os elementos constituintes dos módulos fotovoltaicos por geração dos módulos fotovoltaicos.

**Tabela 3** - Comparação em massa ( $\text{g/m}^2$ ) de diferentes tecnologias

<b>CIGS</b>	<b>CdTe</b>	<b>a-Si</b>	<b>C-Si</b>
Al (<0,1)	Cd (13,1)	Al (0,2)	Ag (0,1)
Cd (0,2)	Cu (0,7)	Fe (600)	Al (270)
Cu (2,2)	Vidro (13.380)	Ga (1,9)	Vidro (6.990)
Ga (2,4)	Sn (1,0)	Vidro (6.690)	Si (698,7)
Vidro (13.380)	Te (10,9)	In (0,4)	Mg (0,1)
In (7,7)	Zn (0,8)	Si (4,6)	
Mo (4,3)		Zn (0,5)	
Se (2,7)			
Sn (0,4)			
Zn (<0,1)			

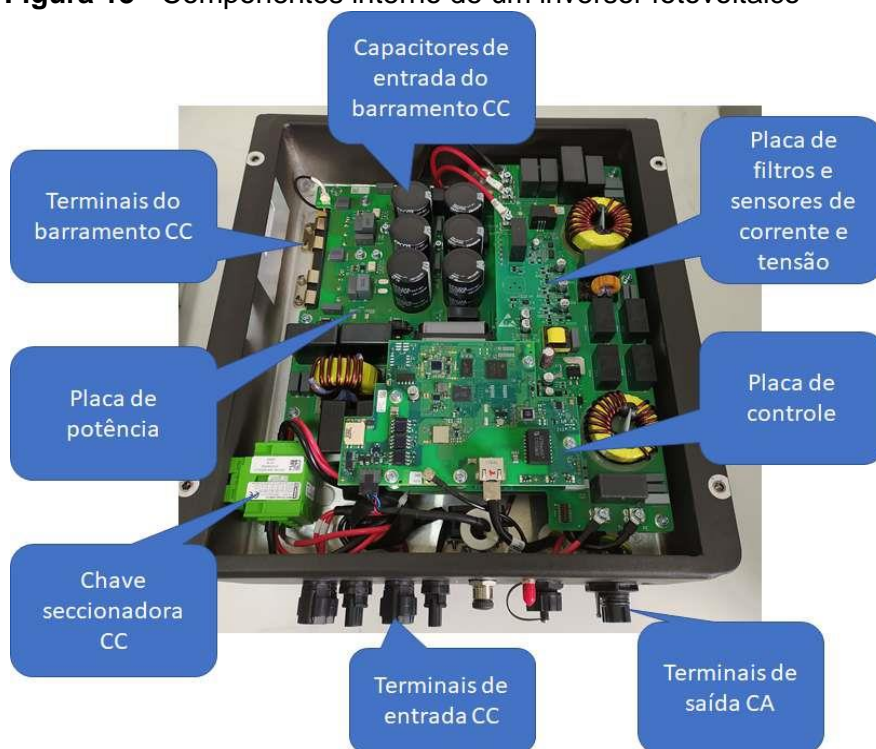
Fonte: Goe e Gaustad (2014)

### 3.2 Resíduos dos Módulos

Segundo Lu (2016), mais de 95% dos módulos fotovoltaicos fabricados no mundo são módulos de silício cristalino ou policristalino, deste montante os módulos de silício policristalino respondem por mais de 90%. Os outros tipos de módulos respondem por atualmente menos de 5% do total de módulos no globo.

Dentre todos os resíduos gerados pelos sistemas fotovoltaicos no final de sua vida útil, sem sombra de dúvidas os módulos fotovoltaicos a serem descartados são a maior preocupação, muito em função do volume gerado, no entanto, todos os elementos do *balance of sistem* (os demais componentes do sistema) merecem atenção em função das características dos resíduos, como é caso dos elementos constituintes dos inversores (Figura 13) com elementos químicos raros e também, alguns, perigosos à saúde dos seres vivos.

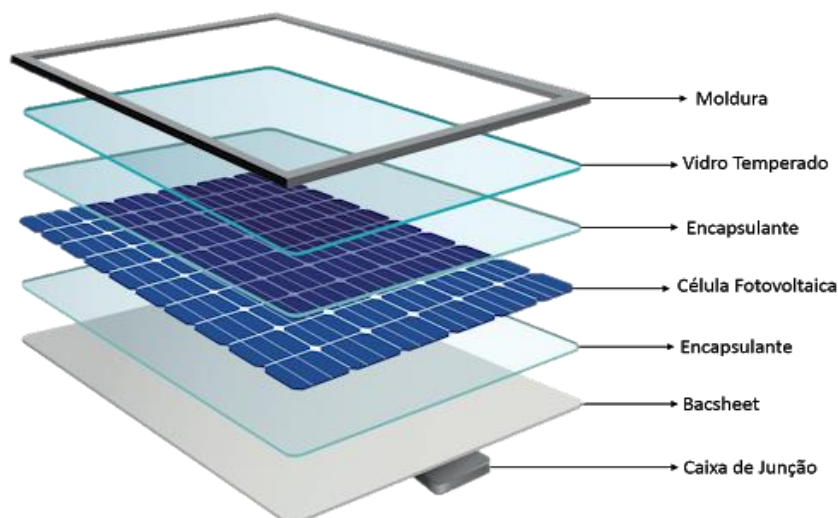
**Figura 13** - Componentes interno de um inversor fotovoltaico



Fonte: Marcelo Vilalva, Portal Solar (2020)

A Figura 14 mostra de forma estratificada os principais componentes de um módulo fotovoltaico. As características principais dos componentes constituintes dos módulos fotovoltaicos à base de silício mono ou policristalino são mostradas a seguir.

**Figura 14** - Componentes principais de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Minha Casa Solar (2019)

### 3.2.1 Moldura

A moldura tem a função de suportar a estrutura do módulo como um todo é formada por alumínio anodizado e corresponde a cerca de 18%, conforme Lautnussa *et al.* (2016) de toda a massa do módulo. No caso da moldura do módulo, o processo de reciclagem do alumínio, apresenta inúmeras vantagens, uma vez que é um processo sustentável, pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder as propriedades físicas do material, pode se alcançar cerca de mais de 90% de economia de energia quando comparado com o consumo de energia necessária para produção de alumínio a partir de recurso primários. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística relata que o alumínio é o metal com maior taxa de reciclagem no Brasil. Tais constatações rotulam a reciclagem do alumínio como altamente salutar para o ambiente, uma vez que estes elementos não são dispostos nos aterros sanitários ou lixões após o seu uso final nos diversos produtos em que são utilizados, e no caso dos módulos de sistema fotovoltaicos não há de ser diferente.

### 3.2.2 Vidro

O vidro, dentro da escala temporal humana, praticamente, não se decompõe. Com cerca de 70% de toda a massa de uma estrutura de um módulo fotovoltaico, o vidro responde pelo maior percentual, em massa, dos resíduos gerados

no descarte destes sistemas, sua reciclagem ou reuso representa, portanto, uma grande contribuição para o meio ambiente, uma vez que estes resíduos deixam de ser destinados aos aterros sanitários, lixões ou em locais inapropriados na forma de entulho.

A reciclagem ou o reuso do vidro torna-se altamente vantajosa do ponto de vista econômico, uma vez que há uma grande economia com o consumo de energia, com a geração de serviços e mão de obra para a cadeia de reciclagem do vidro, como é o caso das cooperativas de catadores e recicladores (Figura 15).

**Figura 15** - Cooperativa de reciclagem de vidro



Fonte: Hélio Romero / AE, O Liberal (2020)

Outro ponto a ser considerado é a economia com a utilização dos recursos primários necessários para a fabricação de vidro, onde para cada tonelada reciclada de vidro deixa-se de retirar da natureza quase que a mesma quantidade de matéria prima, matérias como areia, carbonato de sódio e calcário deixam de serem utilizados (RECICLA SAMPA, 2018). Portanto a reciclagem ou a reutilização do vidro é muito importante para que se tenha um processo sustentável ao longo de todo o seu ciclo.

### 3.2.3 Encapsulante

Com cerca de apenas 5,1% da massa total de um módulo fotovoltaico o encapsulante é o maior responsável pelo fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos, ou seja, redução do rendimento do sistema a uma taxa de 80%. A degradação do material do encapsulante é basicamente em função da radiação ultravioleta, que causa a diminuição à absorção da luz solar em função do material adquirir coloração amarelada. O objetivo principal do encapsulante é fixar as camadas de células fotovoltaicas à estrutura do módulo, questões como vedação e proteção contra intempéries ambientais, também são desempenhadas pelo encapsulante.

Na sua grande maioria, o EVA é o principal material utilizado como encapsulante, no entanto, mais recentemente outros materiais estão ganhando espaço, como o poliuretano termoplástico (TPU), polivinil butiral e compostos à base de silicone. Estes apresentam melhor performance, quando comparados ao EVA que, em geral, leva de 25 a 30 anos para que o material degrade até reduzir a eficiência do módulo em cerca de 80%. No caso dos encapsulantes à base de silicones, esse intervalo de tempo pode ser estendido em até 50 anos, o que na prática significa um aumento da vida útil do sistema de 66% a 100% do tempo de vida de sistemas à base de EVA. Propriedades como melhor estabilidade mecânica, maior resistência a umidade e a radiação ultravioleta, bem como às variações climáticas são adicionadas ao leque de vantagens que os silicones apresentam em relação ao EVA. A Tabela 4 mostra uma tabela comparativa entre as principais características físicas entre encapsulante à base de EVA e a base de silicone.

**Tabela 4** - Principais características físicas entre encapsulantes

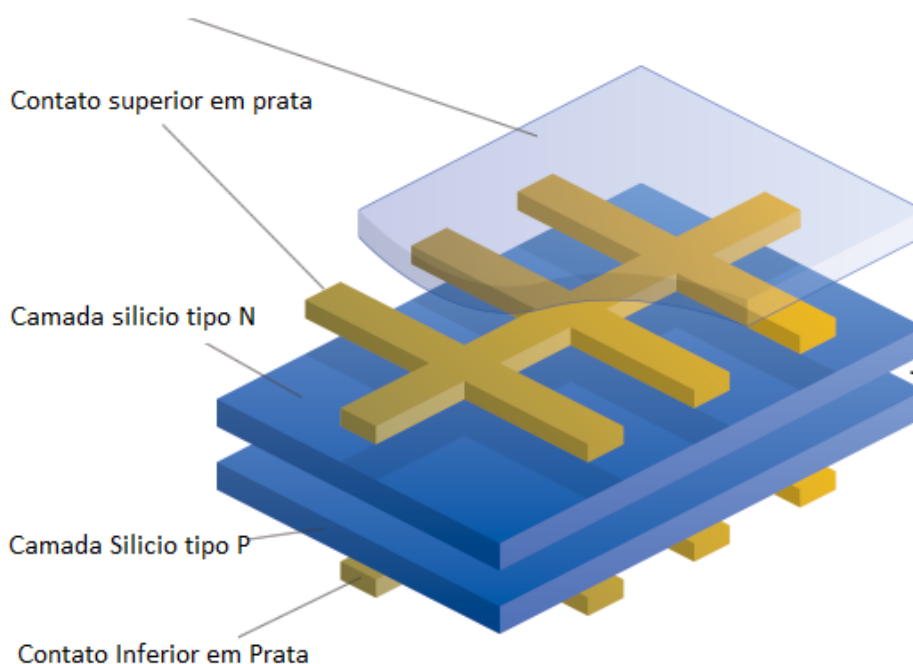
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	<b>EVA</b>	<b>SILICONE</b>
Consumo de energia para laminação (kWh)	49	4,5
Índice de refração	1,482	1,406
Resistência à luz ultravioleta	Baixa	Alta
Temperatura de operação	-40°C a 80°C	-60°C a 250°C
Vida operacional (anos)	25	50

Fonte: Poulek *et al.* (2012)

### 3.2.4 Prata

Muito embora a prata não seja um elemento com significativa percentagem em massa do módulo fotovoltaico ela representa significativo valor econômico (Figura 16).

**Figura 16** - Contatos de prata em módulo fotovoltaico  
Camada antireflexo

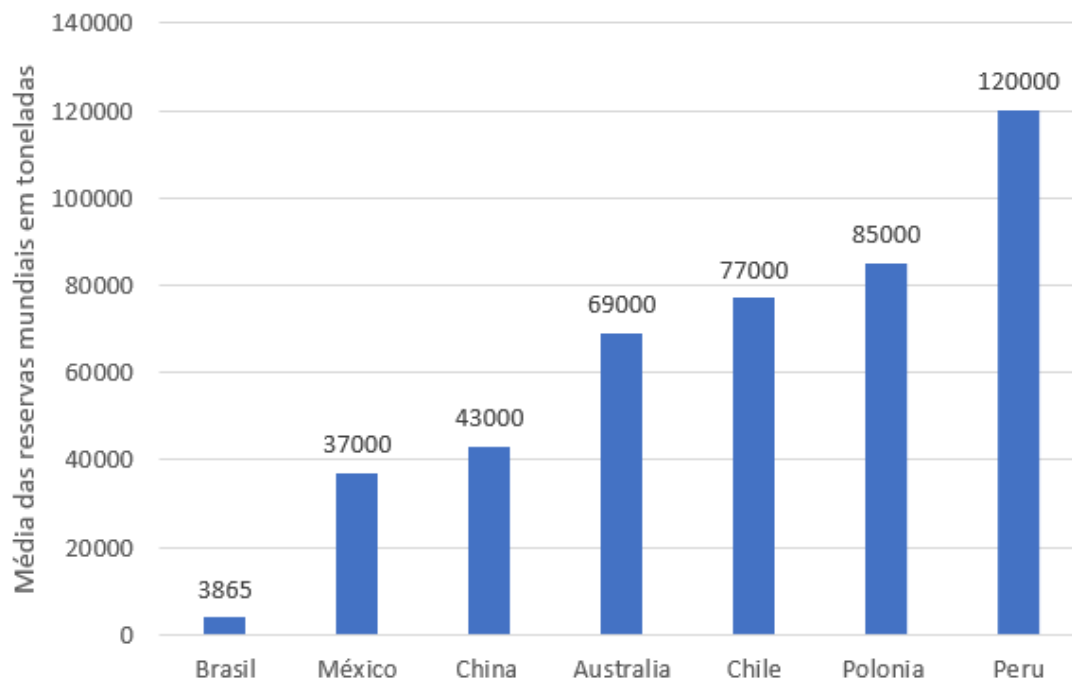


Fonte: Energia Total (2021)

Por apresentar excelentes características físicas de condução e resistência à corrosão, a prata é largamente utilizada como circuito contato para escoamento dos elétrons gerados no material semiconductor, Figura 16. Outra característica importante da prata é sua maleabilidade e ductibilidade que permitem a obtenção de lâminas finíssimas de até 0,003 mm e fios bastantes longos com cerca de 0,38 mg/m (GEOSCAN, 2021).

A prata é um minério raríssimo encontrado em poucos países do mundo e na maioria das vezes o mineral vem sempre associado como subproduto de outros minerais na natureza. No Brasil os relatos de ocorrência de prata são raríssimos, segundo o (GEOSCAN, 2021) toda a quantidade de prata produzida no mundo caberia em um cubo de 55 metros de aresta.

O gráfico 17 mostra as reservas em prata dos países incluindo o Brasil.

**Gráfico 17 - Reservas mundiais de prata**

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Núcleo do Conhecimento (2021)

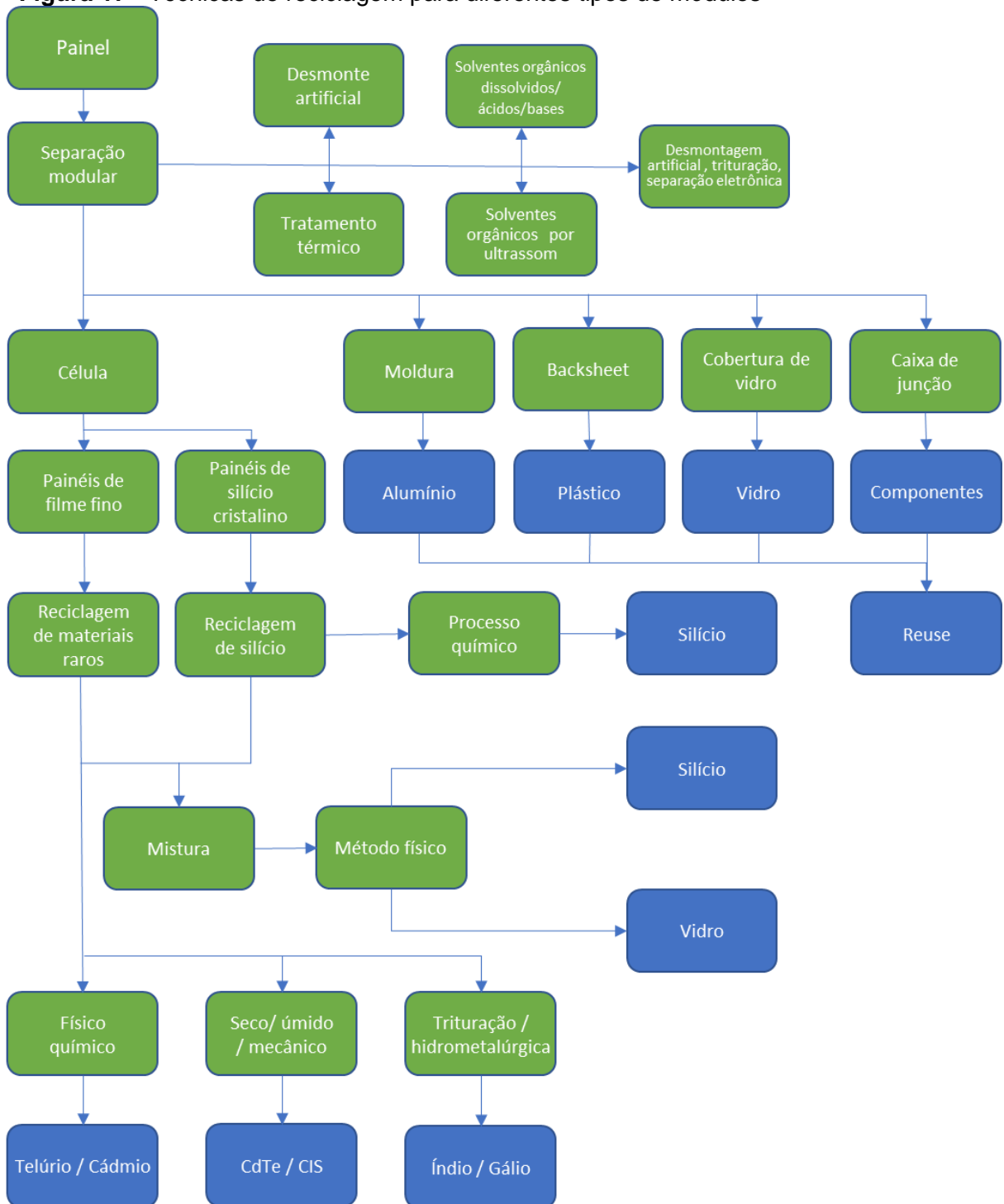
Dado os relatos, torna-se necessária a recuperação da prata constituinte nos resíduos dos módulos fotovoltaicos descartados. Há hoje diferentes tecnologias para a recuperação deste elemento dos módulos e graças aos seus preços já há bastante interesse de empresas principalmente na Ásia, em recuperar a prata dos módulos e materiais eletrônicos em geral. No Brasil, praticamente é inexistente indústria de recuperação ou reciclagem para este elemento, em geral os resíduos de materiais eletrônicos são enviados para fora do país para recuperação de seus elementos raros.

### 3.2.5 Demais Componentes

Para Xu *et al.* (2018), é perfeitamente possível a recuperação e/ou reciclagem do silício e dos metais raros dos módulos fotovoltaicos, conseqüentemente seria possível a geração de uma cadeia de valor econômico completa atingindo todas as fases do ciclo de vida do produto. Existem vários processos desde a utilização de métodos mecânicos a processos utilizando métodos químicos com ácido, solventes alcalinos e orgânicos para remover ou dissolver o EVA. A **Erro! Fonte de referência**

**não encontrada.** mostra de forma simplificada os processos que podem ser aplicados aos módulos fotovoltaicos para a recuperação ou reciclagem de produtos e elementos.

**Figura 17** - Técnicas de reciclagem para diferentes tipos de módulos



Fonte: Autor, adaptado de Xu *et al.* (2018)

Após as etapas de processos mecânicos de moagem dos painéis fotovoltaicos são aplicados processos hidrometalúrgicos com o objetivo de recuperar



materiais como índio e gálio. Materiais como o telureto de cádmio (CdTe) e CIS (cádmio-índio-selênio) de painéis de filme fino são reciclados fazendo-se uso de processos físico-químicos e até mesmo processos mecânicos, como por exemplo usando moagem e flotação ou através de métodos de processamento mecânico a seco, como jato de vácuo.

### **3.3 A importância da reciclagem para o planeta**

A energia solar fotovoltaica será uma das principais fontes de energia global deste século, neste ponto, é muito difícil discordar desta afirmativa, haja vista os números apresentados pelo setor. Os principais países do mundo lançam programas de desenvolvimento em grande escala da fonte solar fotovoltaica. Não à toa, a fonte fotovoltaica apresentou nas últimas décadas crescimento exponencial, números muito superiores aos apresentados por outras indústrias do setor de energia no globo.

O Brasil ainda não demonstrou preocupação em relação ao volume de resíduos que podem ser gerados, quando os atuais sistemas geradores fotovoltaicos instalados chegarem aos seus fins de vida útil, pois uma vez descartados de forma irregular na natureza, os resíduos fotovoltaicos apresentam elementos perigosos à saúde dos seres e muitos de seus elementos componentes, também são escassos e carregam considerável valor econômico.

Portanto, a reciclagem dos painéis fotovoltaicos é extremamente benéfica para o planeta e pode proporcionar a criação de novas oportunidades de negócios, como exemplo tem-se que o custo e a energia necessários para processar o silício proveniente da reciclagem é, aproximadamente, 3 vezes menor que o custo necessário para processar o mesmo material a partir da matéria prima do elemento (CHOI; FTHENAKIS, 2010).

Conforme Xu *et al.* (2018), em 2012 a União Europeia revisou sua diretiva de resíduos eletroeletrônicos (*Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE*), nesta revisão foram adicionadas, ao rol das categorias de resíduos desta diretiva, os resíduos dos sistemas fotovoltaicos; expressando, dessa forma, o dever dos fabricantes e importadores pelos serviços de coleta e reciclagem dos sistemas de geração fotovoltaicos descartados.

Os painéis fotovoltaicos atuais e os painéis que serão desenvolvidos

podem ser reciclados e esta possibilidade está chamando a atenção de muitos pesquisadores e empresas para a produção de novos produtos a partir da recuperação dos elementos reciclados.

#### **4 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL SOBRE OS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS E FOTOVOLTAICOS**

O escopo desta secção é o estudo das legislações e/ou Convenções internacionais sobre o tema envoltório da questão dos REEE levando em consideração o aspecto essencial para a continuidade do uso sustentável da energia solar fotovoltaica, a logística reversa com a coleta e reciclagem dos REEE.

A Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos é um acordo global, atualmente com 53 nações signatárias (Shittu, Williams, & Shaw, 2021), que define critérios para movimentação transfronteiriços de resíduos perigosos, dentre estes resíduos perigosos estão inseridos os resíduos eletroeletrônicos. Esta Convenção pode ser considerada, até a data de publicação deste trabalho, como o maior acordo a nível global que envolve o tema REEE. Embora a importância da Convenção, ela trata basicamente dos assuntos relacionados a movimentação dos resíduos perigosos.

Segundo dados do relatório do Fórum Econômico Mundial (WORLD ECONOMIC FORUM, 2019), até a data de publicação do relatório, existiam no mundo 67 países que possuem em suas legislações algum tipo de tratativa específica para resíduos gerados a partir de produtos eletroeletrônicos. Estes países possuem, aproximadamente, dois terços da população mundial. Por outro lado, regiões como América Latina, África e sudeste asiático, ainda não colocaram em suas agendas políticas a questão dos resíduos eletroeletrônicos.

Quando a questão é em relação aos resíduos dos sistemas de geração fotovoltaicos, o rol de países é mais restrito. Mesmo o Brasil, que possui uma lei específica para tratamento dos resíduos sólidos e que já possui também acordo setorial para a tratativas dos resíduos sólidos de produtos eletroeletrônicos, quando o tema é resíduo de sistemas fotovoltaicos, estes não fazem parte do rol dos resíduos cobertos no Acordo Setorial mencionado, ratificando, portanto, que o tema, ainda, não faz parte da agenda das autoridades e de outros atores responsáveis.

No entanto, assim como aconteceu com o desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica que apresenta taxas altíssimas de crescimento, a tendência global é o aumento exponencial dos resíduos gerados a partir dos sistemas de geração fotovoltaicas em fim de vida útil, o que vai exigir envolvimento das partes durante o ciclo de vida do produto, fazendo-se mister, portanto, a implementação adequada de

políticas, diretrizes e regulamentos.

Uma visão do atual cenário mundial em relação as legislações mais avançadas são mostradas nesta secção. Conforme Sharma *et al.* (2019), regulamentações da União Europeia, uma vez que foi a primeira legislação abrangente que trata do detalhamento técnico da coleta e reciclagem dos REEE entre outros dispositivos (PARUJULY *et al.*, 2019) são apresentadas, além de Alemanha e Reino Unido como as mais avançadas; Estados Unidos, Canada e Japão, são relatadas, bem como são mostrados, também, o status das iniciativas na Itália, República Tcheca, Suíça, China e Coréia do Sul.

#### **4.1 A diretiva europeia de resíduos eletroeletrônicos**

Em função da redução dos ciclos dos produtos e pelo desenvolvimento de novos produtos de forma acelerada, com o volume de material descartado apresentando-se como uma fonte de resíduos a taxas crescentes, agravados por falta de iniciativas e por processos de reciclagem deficientes, o que acaba acelerando os processos de perdas de materiais raros. A existência de diferentes políticas nacionais, em relação a gestão dos REEE, prejudicava a eficácia das políticas de reciclagem na União Europeia (UE), estes foram os principais argumentos levados em consideração para a implementação da diretiva europeia 2012/19/UE para resíduos de materiais elétricos e eletrônicos (*Waste Electric and Electronics Equipments Directive - WEEE*), Figura 18, (União Europeia, 2012). Na UE uma diretiva vem a ser um ato legislativo que tem o objetivo de estabelecer objetivos gerais entre os estados membros. Contudo, fica a critério de cada estado signatário adaptar e incorporar em suas legislações internas esses objetivos gerais.

A WEEE é o principal material regulatório no planeta quando o assunto é resíduo eletroeletrônico. A primeira diretiva WEEE foi estabelecida em 2003 e revisada em 2012 (Shittu, Williams, & Shaw, 2021), incluindo nesta revisão, motivados pelo grande volume em escala dos resíduos fotovoltaicos, a questão da responsabilidade dos fabricantes e importadores de sistemas fotovoltaicos sobre a gestão do ciclo de vida do produto, de tal forma que em 13 de agosto de 2012 o Parlamento e Conselho Europeu estabelecem as novas regras e tratativas para a gestão adequado dos resíduos eletroeletrônicos na União Europeia, acrescentando o adequado processo para a gestão do fim de vida útil dos sistemas geradores de

energia fotovoltaica.

A diretiva WEEE abrange os 27 estados membros (na época eram 28 como Reino Unido), almejando uma abordagem eficaz da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e estabelecendo diferentes níveis de responsabilidades entre todas as partes interessadas. Na UE, todos os fabricantes são legalmente responsáveis pelo adequado gerenciamento dos resíduos gerados por seus produtos, envolvendo as etapas de coleta, recuperação e reciclagem, independentemente de onde os resíduos são gerados. Todas estas etapas possuem diretivas detalhadas, acrescidas ainda de diretivas em relação ao meio ambiente e a segurança da saúde da população.

A partir de 15 de agosto de 2018, a Diretiva da UE sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (Diretiva WEEE), foi aplicada a todos os produtos elétricos e eletrônicos. Os produtos foram reclassificados, das 10 categorias originais para 6 categorias e todos os produtos precisando atender a novos requisitos de recuperação de ciclo de vida dos produtos.

Atualmente todos os países da União Europeia, já apresentaram certo grau de iniciativas para estabelecer regime de coleta, manuseio e tratamento de resíduos fotovoltaicos conforme preconizado na WEEE.

**Figura 18** - Diretiva WEEE para União Europeia



Fonte: BAEL (2021)

A concessão ecológica dos produtos na UE (União Europeia, 2012) visa estabelecer requisitos mínimos que favoreçam a reutilização, facilite o desmontes e valorização dos materiais recuperados. A diretiva visando atender a estes objetivos e

com base no princípio da responsabilidade do produtor, inseriu em seu núcleo desde assuntos relacionados à proibição do uso de certas substâncias em equipamentos eletroeletrônicos, aplicando os requisitos de saúde e segurança relacionados aos produtos químicos, os quais se constitui como uma grande preocupação para as autoridades responsáveis, até as questões referentes ao financiamento da operacionalização do sistema, para que este não venha a sucumbir ante aos elevados custos que são necessários para se manter firme ao objetivo da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

Os princípios básicos dos mecanismos de financiamento para as etapas do fim de vida útil dos REEE devem contribuir para o alcance de taxas elevadas de coleta de REEE e transferir os custos dos contribuintes em geral para os consumidores de produtos eletroeletrônicos.

De uma forma simples, fazendo uso dos princípios da proporcionalidade, poluidor pagador e subsidiariedade, o financiamento dos resíduos é de responsabilidade dos produtores, seguindo o seguinte mecanismo: para o financiamento dos resíduos históricos (equipamentos eletroeletrônicos, EEE, existente antes da entrada em vigor da Diretiva) o financiamento é repartido de forma coletiva por todos os produtores. Em relação aos produtos novos, estes são de responsabilidade dos produtores que arcam com o financiamento para o sistema de coleta dos resíduos de seus produtos. Cada produtor deve providenciar um sistema de garantia, caso seus produtos fiquem órfãos.

Na UE, os EEE passaram por um período de transição, passando de 10 categorias iniciais, que vigorou de agosto de 2012 até agosto de 2018. Os resíduos fotovoltaicos estavam classificados na categoria 4 (Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos). A partir de então passou-se a vigorar uma nova classificação com apenas 6 categorias. Os painéis fotovoltaicos ficaram inseridos na categoria 4, Equipamentos de Grandes Dimensões.

A diretiva WEEE estabelece que a concepção dos produtos deva apresentar requisitos de concepção ecológica que favoreçam a reutilização, desmontagem, reutilização, reciclagem e a valorização dos materiais recuperados. Neste sentido, o Artigo 4º da diretiva fala sobre a concepção dos produtos e da cooperação entre produtores e operadores de unidades de reciclagem nas quais os Estados Membros são levados a incentivar as medidas de concepção de produtos com vista a facilitar a reutilização, desmontagem e a valorização dos materiais

resultantes da desmontagem dos sistemas.

O artigo 5º da diretiva discorre sobre as medidas relativas à coleta seletiva dos resíduos que os Estados Membros devem tomar e das medidas para redução dos REEE não triados, principalmente os REEE de equipamentos de climatização, que contém elementos nocivos à camada de ozônio e que contém gases fluorados. Fica a cargo dos Estados Membros a criação de sistema de coleta, baseados na densidade populacional e que não gere encargos aos consumidores e distribuidores, e que permita facilidade de acesso às instalações de coleta e entrega por parte dos particulares, assegurando aos produtores ou distribuidores, toda vez que estes inserirem novos produtos no mercado, a possibilidade de entrega dos REEE na proporção de um para um, desde que sejam de equipamentos equivalente ou que realizem a mesma função.

Exceções podem ser prevista a este dispositivo, desde que os países membros informem o fato à Comissão. Ademais, os Estados Membro devem assegurar que a entrega dos REEE não seja, por esse motivo, dificultada para o receptor final dos REEE e que tais mecanismos de coleta seletiva continuem sendo gratuitos.

A WEEE estabelece que nas lojas com espaço superior a 400 m<sup>2</sup> possam ser instalados sistema de coletas de REEE por parte dos produtores e distribuidores, sem necessidade, por parte dos consumidores, de compra de produtos eletroeletrônicos equivalentes e de forma gratuita.

Na UE, os REEE que, no caso de sua coleta, coloquem em risco a saúde e segurança das pessoas, devido ao grau de contaminação dos REEE, podem ter a coleta recusada, sendo necessária então a aprovação de disposições específicas para estes resíduos.

Para os REEE que não sejam enquadrados ou caracterizados como domésticos ou semelhante a estes, os Estados Membros devem garantir que os responsáveis procedam à coleta dos referidos resíduos eletroeletrônicos.

#### 4.1.1 Bases normativas na UE sobre energia e resíduos sólidos

As bases normativas da UE para os assuntos relacionados à energia, está fundamentada, principalmente, no artigo 194 do Tratado sobre o Funcionamento da União Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2016b) tendo como base competências

compartilhadas entre a União Europeia e os seus Estados Membros. Dentre os principais objetivos estabelecido no artigo 194 do tratado sobre o funcionamento, tem-se:

- a) Assegurar o funcionamento do mercado da energia;
- b) Assegurar a segurança do aprovisionamento energético da União;
- c) Promover a eficiência energética e as economias de energia, bem como o desenvolvimento de energias novas e renováveis;
- d) Promover a interconexão das redes de energia.

Quando o tema é relacionado à matéria ambiental, como é o caso de assuntos referentes a tratamento de resíduos, as bases normativas estão estabelecidas, principalmente, nos artigos 3º do Tratado da União Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2016b).

A União estabelece um mercado interno. Empenha-se no desenvolvimento sustentável da Europa, assente num crescimento económico equilibrado e na estabilidade dos preços, numa economia social de mercado altamente competitiva que tenha como meta o pleno emprego e o progresso social, e num elevado nível de proteção e de melhoramento da qualidade do ambiente.

Os demais artigos que fundamentam a questão ambiental na UE são os artigos 11, 191, 192 e 193 do Tratado sobre o Funcionamento da União Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2016b)

Com o objetivo de promoção do desenvolvimento sustentável, o Artigo 11 relata o dever de integração e as exigências das matérias de proteção do ambiente. O artigo 191 discorre sobre a política no domínio do ambiente e a contribuição para a prossecução de objetivos tais como: preservação, proteção e melhoria da qualidade do ambiente; proteção da saúde das pessoas, utilização prudente e racional dos recursos naturais; promoção, no plano internacional, de medidas destinadas a enfrentar os problemas regionais ou mundiais do ambiente e designadamente a combater as alterações climáticas. Ainda no tocante a este artigo, os princípios da precaução e da ação preventiva, da correção, prioritariamente na fonte, dos danos causados ao ambiente e do poluidor pagador são estabelecidos como princípios base a serem adotados na UE. Os artigos 192 e 193 discorrem, entre outros assuntos, sobre as medidas e ações que devem ser empreendidas para o alcance dos objetivos previstos no artigo 191.

Quando se observa o cenário interno das nações na UE, Alemanha e Reino



Unido (este enquanto membro da UE) foram as nações que mais evoluíram no aspecto de tratamento dos resíduos sólidos de equipamentos eletroeletrônicos. Estes países já apresentavam uma vasta base legal relacionadas às questões ambientais e energéticas. No caso específico da Alemanha, a relação é vasta. Associadas a uma série de outras leis do setor energético e a ambiental, como as leis de fontes de energias renováveis e suas várias alterações (2000, 2005, 2009, 2012, 2014 e 2017), lei de PV (2003, 2010 e 2013), e a *electricity feed-in Act* de 1991, a qual foi o primeiro sistema de tarifa verde do mundo. Pelo lado ambiental, percebe-se grande influência do direito internacional e das diretivas da UE (ELSPAß; FELDMANN, 2020) destacam-se: Controle de emissões ao abrigo da Lei Federal de Controle de Emissões; controle, eliminação e gestão de resíduos ao abrigo da Lei de Gestão do Ciclo Fechado; Controle e gestão da água sob a Lei Federal de Recursos Hídricos; Conservação do solo ao abrigo da Lei Federal de Proteção do Solo; Conservação da natureza e da paisagem sob a Lei de Proteção da Natureza e Conservação da Paisagem; Avaliação do impacto ambiental ao abrigo da Lei de Avaliação do Impacto Ambiental.

No Reino Unido, conforme Raybould *et al.* (2019), a política e a legislação do governo têm sido bastante expressivas no investimento em tecnologia de energia renovável, o que vem impulsionando a inovação desde 1990, resultado este, fruto de várias metas juridicamente vinculativas no que diz respeito à tecnologia de energia renovável e a redução de gases de efeito estufa. Segundo (Cole, Gnanapragasam, Cooper, & Singh, 2019), a legislação sobre REEE no Reino Unido evoluiu significativamente desde 1970, sendo que a maioria da legislação contemporânea que trata do controle e gestão de REEE é originada na UE. Foi a Diretiva (75/442 / CEE) que introduziu pela primeira vez no reino Unido a definição de resíduo, a hierarquia de resíduos e as estratégias destinadas a prevenir os impactos prejudiciais dos resíduos ao ambiente e na saúde dos seres vivos.

#### 4.1.2 Eliminação e transporte dos REEE recolhidos segundo a diretiva 2012/19/UE

Na UE ficou proibida a eliminação de REEE recolhidos em coleta seletiva sem o devido tratamento específico. A coleta seletiva e o transporte dos REEE devem ser efetuados de forma a proporcionar as melhores condições à reutilização, preparação, confinamento e reciclagem das substâncias perigosas constituintes nos REEE. Antes de novas transferências, objetivando a maximização da preparação para

a reutilização, os centros de coleta devem prever, quando adequado, a separação, nos pontos de coleta, dos REEE e preparar para a reutilização dos outros REEE separados seletivamente.

#### 4.1.3 Taxa de coleta

Foi estabelecido na UE que os países membros garantam a aplicação do princípio da responsabilidade do produtor e que seja exigido uma taxa mínima, anual, a partir do ano de 2016, sendo que esta taxa mínima foi estabelecida em 45%. No entanto, o volume recolhido deveria evoluir de forma gradativa entre os anos de 2016 e 2019. A taxa de coleta foi então estabelecida, tendo como base o peso total do volume dos REEE coletados em um dado país, em determinado ano e em valores expressos como percentagem do peso médio dos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores nesse país.

A partir de 2019, a taxa anual de coleta mínima a ser aplicada foi estabelecida em 65 % da massa média dos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores, em um determinado país membro, ou, alternativamente, de 85 % dos REEE gerados no território desse Estado Membro. Ficou, então, estabelecido que até o fim do ano de 2015 os países da UE deveriam aplicar uma taxa mínima de coleta seletiva de REEE de 4 kg per capita ano, provenientes de particulares, ou a mesma quantidade de REEE que, em média, foi recolhida nesse Estado Membro nos três anos anteriores, conforme o maior destes valores.

Com o objetivo de garantir condições igualitárias para a aplicação do mecanismo de determinação das taxas mínimas ficou adotado um sistema de metodologia comum para o cálculo do peso dos EEE colocados no mercado nacional de cada país membro e uma metodologia comum para o cálculo da quantidade, em peso, de REEE gerados em cada Estado Membro.

#### 4.1.4 Tratamento adequado

A diretiva europeia estabeleceu que todos os Estados Membros devessem assegurar o tratamento adequado dos REEE coletados de forma seletiva. O tratamento adequado deve incluir, no mínimo, a remoção de todos os fluidos e um tratamento seletivo de acordo com o disposto em lista anexa à diretiva, exceção à

preparação para a reutilização e das operações de valorização e reciclagem de REEE.

#### 4.1.5 Transferências de REEE

É possível haver operação de tratamento de REEE fora da UE, mas para isto, a transferência deve obedecer aos termos dos regulamentos (CE) n.o 1013/2006 e (CE) n.o 1418/2007 da Comissão, novembro de 2007, relativo à exportação para fins de valorização de determinados resíduos. Neste caso, os REEE exportados da União Europeia para serem contabilizados com o cumprimento das obrigações e objetivos previstos na diretiva e de acordo com os regulamentos da Comissão Europeia, o exportador deve provar que o tratamento ocorreu em condições equivalentes aos requisitos da diretiva.

#### 4.1.6 Objetivos de valorização econômica dos materiais

No caso da UE, em relação à valorização dos materiais coletados de forma seletiva e enviados para tratamento, os produtores de REEE devem atingir os seguintes objetivos mínimos, conforme preconizado no anexo V da referida diretiva:

Parte 1: Objetivos mínimos aplicáveis, por categoria, no período compreendido entre 13 de agosto de 2012 e 14 de agosto de 2015 relativamente às categorias enunciadas no Anexo I.

- a) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 1 ou 10 do Anexo I, — 80 % devem ser valorizados, e — 75 % devem ser reciclados;
- b) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 3 ou 4 do Anexo I, — 75 % devem ser valorizados, e — 65 % devem ser reciclados;
- c) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 2, 5, 6, 7, 8 ou 9 do Anexo I, — 70 % devem ser valorizados, e — 50 % devem ser reciclados;
- d) Relativamente às lâmpadas de descarga de gás, 80 % devem ser reciclados.

Parte 2: Objetivos mínimos aplicáveis, por categoria, no período compreendido entre 15 de agosto de 2015 e 14 de agosto de 2018 relativamente às categorias enunciadas no Anexo I.

- a) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 1 ou 10 do Anexo I, — 85 % devem ser valorizados, e — 80 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;
- b) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 3 ou 4 do Anexo I, — 80 % devem ser valorizados, e — 70 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;

- c) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 2, 5, 6, 7, 8 ou 9 do Anexo I, — 75 % devem ser valorizados, e — 55 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;
- d) Relativamente às lâmpadas de descarga de gás, 80 % devem ser reciclados.

Parte 3: Objetivos mínimos aplicáveis, por categoria, a partir de 15 de agosto de 2018 relativamente às categorias enunciadas no Anexo III.

- a) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 1 ou 4 do Anexo III, — 85 % devem ser valorizados, e — 80 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;
- b) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 2 do Anexo III, — 80 % devem ser valorizados, e — 70 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;
- c) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 5 ou 6 do Anexo III, — 75 % devem ser valorizados, e — 55 % devem ser preparados para a reutilização e reciclados;
- d) Relativamente aos REEE pertencentes à categoria 3 do Anexo III, 80 % devem ser reciclados

Para cada categoria é calculado o cumprimento dos objetivos, expresso em percentagem. Este processo é realizado dividindo o peso dos REEE que entram nas instalações (de reciclagem, preparação ou valorização) para a reutilização, após terem sido devidamente tratados, pelo peso de todos os REEE coletados através de coleta seletiva. Segundo a diretiva, todos os países membros da UE devem promover o desenvolvimento de novas tecnologias de valorização, reciclagem e tratamento dos REEE.

#### 4.1.7 Financiamento relativo aos REEE provenientes de particulares

Os Estados Membros devem garantir que sejam disponibilizados pelos produtores, pelo menos, o financiamento da coleta seletiva, o tratamento, valorização e a eliminação, quando aplicável, em condições ambientais favoráveis dos REEE entregues nas instalações de coleta por particulares. Além disso, os Estados Membros podem, quando conveniente, estabelecer incentivos aos produtores para financiarem, também, os custos decorrentes da coleta de REEE provenientes de particulares e do seu transporte até às instalações de coleta, reciclagem ou tratamento dos materiais recolhidos. Contudo, a diretiva estabelece que para os produtos colocados no mercado após 13 de agosto de 2005, cada produtor é responsável pelo financiamento das operações de coleta e tratamento dos REEE relacionadas com os resíduos dos seus próprios produtos, entregues nos postos de coleta. Estes produtores têm a opção

de cumprir esta obrigação de forma individual ou fazendo adesão a um sistema coletivo.

Na EU, os países membros devem garantir que os produtores forneçam uma garantia (através de regimes de financiamentos, seguros ou de contas bancárias bloqueadas) ao colocar no mercado um produto, sinalizando que haverá financiamento da gestão dos REEE. Para os produtos colocados no mercado antes de antes de 13 de agosto de 2005 (resíduos históricos) a responsabilidade pelo financiamento dos custos de gestão dos REEE deve ser rateada, de forma proporcional, por todos os produtores existentes no mercado, na proporção da respectiva participação de mercado por cada tipo de equipamento.

Nos casos em que os EEE sejam transferidos para colocação em mercados fora do território do Estado Membro, medidas cabíveis devem ser tomadas no sentido de garantir o reembolso dos produtores através do desenvolvimento de mecanismos ou procedimentos adequados para o devido reembolso das contribuições realizadas pelos produtores. Nada impedindo que os referidos mecanismos possam ser desenvolvidos pelos próprios produtores ou mesmo por terceiros em nome destes produtores.

#### 4.1.8 Financiamento relativo aos REEE provenientes de utilizadores não-particulares

Em relação aos produtos provenientes de usuários não particulares e inseridos no mercado após 13 de agosto de 2005, a UE estabeleceu que o financiamento dos custos referentes à coleta, tratamento, valorização e eliminação destes REEE sejam de responsabilidade dos produtores. Também é de responsabilidade dos produtores os custos de financiamento dos REEE históricos (os inseridos no mercado anteriormente a 13 de agosto de 2005), desde que estes sejam substituídos por produtos similares ou que cumpram a mesma função.

No entanto, existe a alternativa de que os países membros da UE possam estabelecer regras onde os usuários não particulares sejam, também, totais ou parcialmente responsabilizados pelos custos de financiamento da coleta e demais tratativas referentes a estes REEE históricos. Em relação aos outros resíduos históricos, o financiamento dos custos deve ser de responsabilidade total dos usuários não particulares. A diretiva, no entanto, prevê a possibilidade de produtores e usuários não particulares estabelecerem outras formas ou métodos de financiamento.

#### 4.1.9 Informação aos usuários

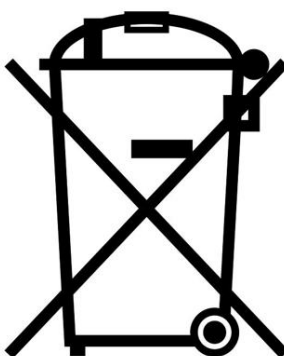
Fica a critério dos países membros da UE exigir ou não dos produtores a indicação aos consumidores dos custos de coleta, tratamento ou eliminação, salvaguardada as boas condições ambientais dos produtos postos à venda. No entanto, estes custos devem ser compatíveis com os custos praticados no mercado, não havendo maiores detalhes a respeito de como é feita esta pesquisa de custos. Além destas informações relacionadas aos custos, os países devem garantir que todos os usuários de EEE tenha acesso às seguintes informações necessárias (UNIÃO EUROPEIA, 2012):

- a) Da obrigação dos usuários não descartarem os REEE como resíduos urbanos não triados e de procederem à coleta seletiva desses REEE;
- b) Sobre os locais de coleta disponíveis, independentemente dos responsáveis por sua criação e com a informação sobre os pontos de coleta fluindo de forma coordenada;
- c) Da importância da contribuição dos usuários para a reutilização, reciclagem e outras formas de valorização dos REEE;
- d) Os efeitos potenciais ao ambiente e a saúde humana provenientes de substâncias perigosas presentes nos EEE;
- e) O significado do símbolo mostrado no Anexo IX

A Figura 19 mostra a imagem do símbolo apresentado no anexo IX da WEEE.

A diretiva estabelece que os países membros estabeleçam medidas para que os consumidores participem de forma adequada do processo de coleta seletiva e que estes sejam encorajados a facilitar os processos de reuso, tratamento e valorização do REEE.

**Figura 19** - Símbolo para produtos recicláveis



Fonte: WEEE (2021)

Com o objetivo de reduzir ou eliminar a quantidade de REEE coletados como RSU, que não tenham passado pelo processo de triagem, é exigido dos produtores de EEE que estes realizem uma marcação no produto, preferencialmente, ou na embalagem ou manuais de instrução (quando não possível no produto), conforme norma europeia com o símbolo mostrado na Figura 19 para todos os produtos EEE inseridos no mercado.

Fica a critério dos países membros exigir ou não dos distribuidores que as informações ora apresentadas possam ser fornecidas nas instruções de utilização, pontos de venda dos produtos e, também, através de campanhas de sensibilização.

#### 4.1.10 Centros de tratamento de REEE

Os produtores de EEE devem, em um período máximo de um ano, a partir da entrada no mercado de novos produtos EEE, fornecer aos centros de tratamento, reciclagem ou triagem de REEE, todas as informações necessárias (sob a forma de manuais ou meio eletrônico) e de forma gratuita, com o objetivo de facilitar a preparação para o reuso e tratamento adequado dos REEE. As informações fornecidas devem indicar de forma precisa a localização das substâncias presentes nos EEE bem como identificar os componentes e as substâncias perigosas contidas nos REEE. Os produtos inseridos no mercado, após a data de 13 de agosto de 2005, devem ser marcados, preferencialmente, com marca normatizada pelo padrão da UE.

## 4.2 A situação atual de algumas nações em relação aos RSFV

Em primeiro plano, é importante esclarecer que a definição de escolha desses países aqui relatados se procedeu, principalmente, pelo fato da existência de trabalhos já publicados a respeito do tema da questão dos RSFV, conforme pode ser observado nos trabalhos apresentados por (SHARMA; PANDEY; KOLHE, 2019; PARUJULY *et al.*, 2019; YUE; YOU; DARLING, 2014). Observa-se que o avanço da tecnologia fotovoltaica para geração de energia elétrica nestes países encontra-se em estágio já consolidado, inclusive com volume de material crescendo a cada ano, em função dos primeiros sistemas instalados já estarem chegando ao fim de vida útil. No entanto, destaque é dado para os países da Europa, principalmente, Alemanha e Reino Unido, que foram as primeiras nações a implementarem de forma efetiva em

suas legislações os princípios e determinações da diretiva sobre REEE da UE.

Os países da Europa, membros da UE, devem incorporar aos seus sistemas legislativos internos as determinações da WEEE. Embora países como Alemanha e Reino Unido já estejam em um estágio mais avançado, a situação não é nivelada no restante do bloco, podendo-se observar diferentes estágios entre as nações. Observações, também, foram realizadas para Japão e Estados Unidos da América, China e Coreia do Sul, que são importantes mercados, tanto a nível de consumo quanto para desenvolvimento de tecnologia de produção e reciclagem de sistema fotovoltaicos. No entanto, é mister frisar que não existe a nível global Convenções a respeito do tema dos RSFV, existe, no entanto, a Convenção da Basileia já mencionada anteriormente para a questão da movimentação de REEE. Porém, já é possível observar uma gama bastante vultosa de trabalhos técnicos publicados a respeito do tema. A seguir é mostrado o panorama atual sucinto dos países em relação a questão dos RSFV.

#### 4.2.1 A situação na Alemanha

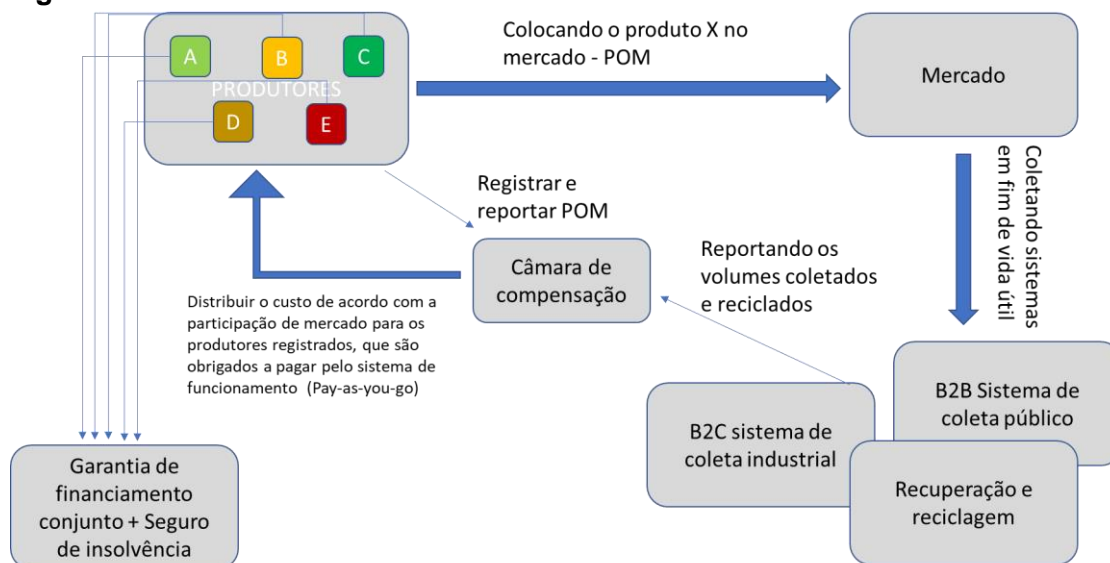
Na Alemanha, a diretiva WEEE da UE foi incorporada à Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (ELEKTRODGD) em outubro de 2015. Face à grande capacidade instalada de sistemas na Alemanha a incorporação da WEEE contribuiu com o fornecimento de apoio financeiro e com a criação de sistemas de coleta e recuperação de resíduos fotovoltaicos para reciclagem adequada das instalações em fim de vida útil.

Nesta linha, o governo da Alemanha criou dois mecanismos para a implementação do programa de reciclagem de módulos fotovoltaicos. O primeiro deles é um sistema empresa consumidor chamado *Business-to-Consumer* (B2C) no qual os fabricantes são responsáveis pelas obrigações futuras do fim de vida útil dos módulos fotovoltaicos. Uma ilustração deste sistema é mostrada na Figura 20.

No sistema B2C são estabelecidos 2 níveis: no nível 1 são definidos os custos relacionados à operação do sistema de coleta e reciclagem de produtos residuais fotovoltaicos de sistemas que foram instalados antes da entrada em vigor da Lei. Um sistema chamado *Pay as You Go* (PAYG) é utilizado na prática para cobrir os custos de Nível 1 para todas as partes interessadas do mercado que colocaram seus produtos no mercado sob a categoria B2C.



**Figura 20 - Mecanismo B2C na Alemanha**

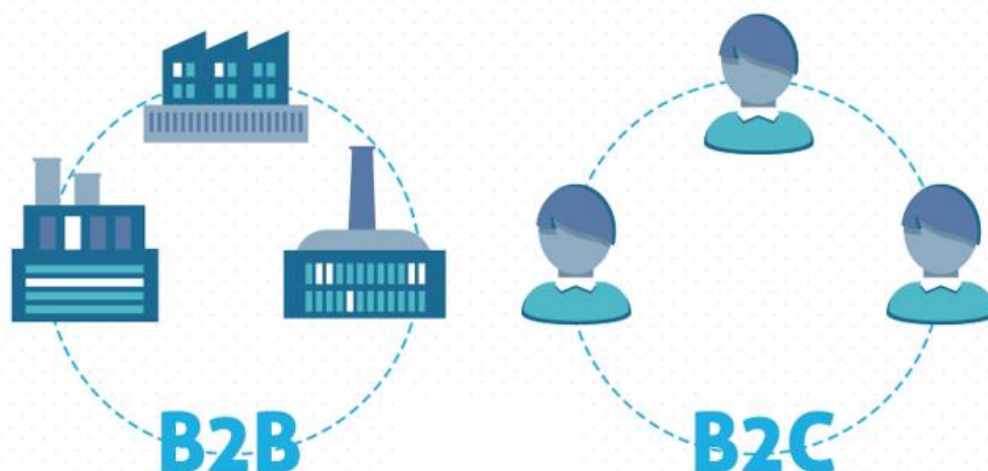


Fonte: Adaptado de Sharma, Pandey e Kolhe (2019)

No nível 2, o mecanismo cobre o financiamento para as futuras coletas e reciclagem dos módulos fotovoltaicos que foram instalados após a entrada em vigor da lei. Os custos são calculados levando em consideração todas as etapas necessárias do ciclo de vida do produto. Além desses mecanismos, é necessário antes de os produtores colocarem seus produtos no mercado, que todos eles sejam registrados em uma câmara de compensação. No final das contas, os custos de coleta e reciclagem de todos os resíduos fotovoltaicos são distribuídos entre os atores registrados no mercado de acordo com o volume de resíduos coletados.

O segundo mecanismo implementado na Alemanha é um sistema chamado *Business-to-Business* (B2B), Figura 21, neste sistema não há a responsabilidade dos produtores pelo fim de vida útil do produto. Este mecanismo é mais vantajoso para as situações em que os proprietários de sistemas de geração fotovoltaicos façam a entrega do sistema no fim de seu ciclo de vida útil. De uma forma resumida, o sistema B2C é mais adequado para produtores residenciais ou comerciais em menor porte, enquanto o sistema B2B é mais adequado para grandes produtores de energia, como parque de geração de energia elétrica de fonte fotovoltaica de grande porte.

**Figura 21** - Sistemas B2C e B2B na Alemanha



Fonte: Adaptado Skyhub (2021)

De uma forma resumida, a Alemanha cobre atualmente, tanto as necessidades decorrentes do uso de sistemas fotovoltaicos pelo mercado doméstico, quanto pelo uso no mercado não doméstico, como no comércio, indústria, governo e nos sistemas de geração em grande escala.

#### 4.2.2 Reino Unido

Enquanto membro da União Europeia, o Reino Unido foi a primeira nação a incorporar a diretiva WEEE no seu arcabouço legal. Em primeiro de janeiro de 2014 o Reino Unido tornou obrigatório que todos os fabricantes e importadores de módulos fotovoltaicos sejam registrados e que compartilhem dados e informações sobre os equipamentos produzidos, bem como planos de manejo das etapas do fim de vida útil do produto, obrigando que todos os fabricantes sejam registrados em um sistema de conformidade de produto B2C para pequenos produtores de energia e ou B2B para os produtores de energia em escala. Porém, a legislação do Reino Unido diverge em alguns requisitos da diretiva WEEE da União Europeia quando o tema é a questão financeira. No Reino Unido, os fornecedores são obrigados a financiarem a coleta de módulos domésticos com base na participação de mercado. Para os sistemas de grande porte, não domésticos, os produtores são obrigados a financiarem os manuseios e reciclagem dos módulos.

#### 4.2.3 Itália

Na Itália a diretiva WEEE entrou em vigor em julho de 2005, no entanto, por falta de sistema de financiamento e regulamentação clara e falhas na articulação e coordenação, o programa para coleta e reciclagem de resíduos eletroeletrônicos não foi levado de forma mais contundente, como aconteceu na Alemanha e Reino Unido.

Contudo, em abril de 2014, a Itália se tornou o primeiro grande ator do mercado fotovoltaico a adaptar a diretiva WEEE às suas diretrizes de política nacional. A Itália estabeleceu o princípio da responsabilidade estendida do produtor, obrigando-os a se registrarem em um sistema nacional e os responsabilizando financeiramente, dentro do país, pelo transporte e reciclagem de todos os módulos fotovoltaicos. Objetivando garantir que a diretriz seja cumprida, cobrindo todas as atividades das etapas do fim de vida do produto, ou seja, coleta, descarte e reciclagem, o governo italiano reteve uma certa parte da tarifa *feed-in*. O montante retido só é reembolsado se os fabricantes de módulos fotovoltaicos provarem que os módulos foram adequadamente eliminados ou reciclados em um prazo máximo de seis meses após a sua coleta.

O mecanismo financeiro para coleta, manuseio e tratamento de resíduos fotovoltaicos na Itália obriga os fabricantes a obterem seus próprios recursos financeiros, caso contrário, eles não receberão seu dinheiro de volta no final do período estabelecido, o que torna esse sistema diferente de Alemanha e Reino Unido.

#### 4.2.4 Suíça

Na Suíça, no final de 2014, a SENS; uma fundação criada pelo governo em 1991 para cuidar dos resíduos da chamada linha branca, juntamente com a SWINCO RECYCLING uma associação industrial da Suíça e que viabiliza o suporte financeiro do programa suíço assumiram o compromisso de aderir as diretrizes europeias (WEEE) sobre o tratamento adequado de resíduos eletroeletrônicos para o cenário suíço.

Até 2015 a coleta de sistemas fotovoltaicos só era possível através de comunicado via e-mail ou fax para a SENS. Após 2015 foram criados vários pontos de coleta e tratamento adequado no país, sendo que já foram coletadas mais de 70

toneladas de resíduos fotovoltaicos.

#### 4.2.5 Noruega

Na Noruega, apesar deste país não integrar a União Europeia, por força do Acordo Espaço Econômico Europeu (EEA), a Noruega foi obrigada a aderir às diretrizes WEEE, sendo um dos primeiros países do globo a implementar a regulamentação WEEE, adotando o sistema de recuperação WEEE.

Em 2006 a legislação norueguesa foi modificada para atender à diretiva WEEE, e a diretiva WEEE mais recente da UE entrou em vigor na Noruega em 22 de agosto de 2013. Na Noruega, a diretiva WEEE é mais abrangente que na União Europeia, onde então existiam 10 categorias de produtos eletroeletrônicos, na legislação norueguesa foram estabelecidas 14 categorias, quando foram acrescentadas categorias que abrangem os WEEE da indústria e comércio. As práticas de tratamento de WEEE norueguesas levam em consideração os sistemas de geração fotovoltaicos.

Com o apoio do governo, que forneceu apoio financeiro, a agência ambiental da Noruega registrou 5 empresas que são responsáveis pelo tratamento de resíduos elétricos e eletrônicos de empresas, fornecedores e municípios naquele país. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são então coletados e tratados conforme as diretrizes especificadas pela regulamentação de resíduos da Noruega.

Na Noruega, as práticas de tratamento WEEE seguem o esboço das práticas finlandesas e suecas com o intuito de atingirem altas taxas de recuperação de materiais e cumprir os requisitos para tratamento de substâncias perigosas.

#### 4.2.6 República Tcheca

A República Tcheca introduziu a diretiva WEEE da UE em sua legislação em 1 de janeiro de 2013, estabelecendo a responsabilidade dos operadores de usinas fotovoltaicas em fornecer financiamento para o controle e gerenciamento dos resíduos gerados de sistemas fotovoltaicos em fim de vida útil.

Aos operadores de centrais fotovoltaicas, introduzidas no mercado antes de 1 de janeiro de 2013, a lei tcheca impõe a responsabilidade com o financiamento da coleta, separação, processamento, reutilização e eliminação de resíduos elétricos de módulos fotovoltaicos. A partir de 1 de janeiro de 2014 um sistema coletivo,

formado pelos operadores, assumiu a responsabilidade de garantir o tratamento adequado dos resíduos de módulos fotovoltaicos para as instalações fotovoltaicas introduzidas a partir de 1 de janeiro de 2014. Conforme especificado na diretiva 2012/19 / EU, na República Tcheca, pelo menos 70% do material deve ser reciclado e 80% deve ser reutilizado.

#### 4.2.7 Estados Unidos

Nos Estados Unidos da América, ainda, não existe uma lei nacional específica sobre a questão da gestão dos resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil, o que se aplica é a lei geral de resíduos do país. No entanto, mais de 25 estados e o Distrito de Columbia já promulgaram, de alguma forma, legislação a respeito da questão do descarte de REEE. Essas leis estaduais variam bastante em seus escopos e impacto, e se proíbem ou não os consumidores de descartarem os REEE em aterros sanitários. A grande maioria dos estados que implementaram alguma forma de legislação utilizam a abordagem da responsabilidade estendida do produtor (FORTI *et al.*, 2020).

Estados como Califórnia, Washington, já possuem iniciativas no sentido de desenvolver seus próprios regulamentos e leis para a utilização e reciclagem de módulos fotovoltaicos.

Na Califórnia, foi aprovada em outubro de 2015 a lei n°. 489 (CALIFÓRNIA LEGISLATURE, 2015) que autorizou o Departamento de Controle de Substâncias Tóxicas (DTS) a adotar regulação para descarte dos módulos fotovoltaicos no fim de vida útil. Os componentes dos módulos são classificados como resíduos perigosos e devem ser gerenciados como “*universal waste*”, mesma categoria de baterias, pesticidas, equipamentos que contenham mercúrio, lâmpadas fluorescentes, neon, vapor de mercúrio, sódio, entre outras.

No estado de Washington, foi aprovado em julho de 2017, projeto de lei 5939 do Senado, que modifica os incentivos fiscais do sistema estadual de energia renovável e exige um programa de devolução e reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida, exigindo que os fabricantes que desejam introduzir seus módulos fotovoltaicos no estado de Washington após 1º de julho de 2017 sejam responsáveis por fornecer financiamento para o programa de reciclagem. Aqueles produtores que não se enquadrem não serão permitidos vender módulos fotovoltaicos após 1º de

janeiro de 2021 no estado de Washington.

Nos EUA existem várias organizações de coleta voluntária para módulos fotovoltaicos em fim de vida, que tentam promover de maneira mais fácil para os clientes uma solução de gerenciamento de fim de vida econômica e ecologicamente correta, evitando o aterro, além de criar consciência e promover a reciclagem de sistemas fotovoltaicos entre as diferentes partes interessadas.

#### 4.2.8 Canadá

Segundo relatado por Shittu, Williams e Shaw (2021) e Forti *et al.* (2020), o Canadá não possui legislação federal a respeito de REEE. Porém, 12 províncias e territórios canadenses possuem regulamentações a respeito da gestão dos REEE. Neste sentido, também não há nenhuma legislação específica para a questão dos resíduos de sistemas fotovoltaicos em fim de vida útil. No Canadá, a implementação da gestão de REEE é realizada, predominantemente, pelo setor privado no cenário de um Programa de *Stewardship: Electronic Product Stewardship Canada (EPSC)*, no qual resultam em organizações de gestão de REEE as quais exigem licenças de operação, que são sujeitas a uma auditoria realizada por um Gabinete de Qualificação de Recicladores (*Recycler Qualification Office-RQO*).

O RQO é responsável por executar o Programa Nacional de Qualificação de Reciclador, que promove a garantia de que os REEE sejam reciclados de maneira segura e ambientalmente adequada. De uma maneira geral, no Canadá o escopo da responsabilidade estendida do produtor é muito mais amplo que nos EUA.

#### 4.2.9 China

Na China, sistemas de geração fotovoltaicos em fim de vida útil não estão incluídos no regulamento de processamento de resíduos elétricos e eletrônicos. O que há, apenas, são recomendações para o desenvolvimento de diretrizes de políticas para enfrentar os desafios de resíduos fotovoltaicos.

Em janeiro de 2011, entrou em vigor o Regulamento de Gerenciamento de Reciclagem de Resíduos de Produtos Elétricos e Eletrônicos, tornando obrigatório que o lixo eletrônico seja coletado e reciclado em um sistema de processamento centralizado. Os fabricantes têm a possibilidade de poderem coletar e reciclar os

produtos por conta própria ou contratar o serviço de empresas de serviço pós-venda ou recicladores de resíduos eletroeletrônicos e confiar a reciclagem ou o descarte a empresas qualificadas.

#### 4.2.10 Coreia do Sul

Na Coreia do Sul, também não existem regulamentos ou leis que tratam do tema gestão do fim de vida útil dos sistemas fotovoltaicos. No entanto, existem propostas por parte do governo para a implementação de diretrizes às partes interessadas que as obriguem a relatar a eliminação de resíduos fotovoltaicos sob a “Lei sobre a Promoção do Desenvolvimento, Uso e Difusão de Energia Nova e Renovável”, conforme Sharma, Pandey e Kolhe (2019). Segundo os promotores da proposta é mais simples e econômico alterar a lei existente sobre energias renováveis que produzir uma nova legislação sobre resíduos fotovoltaicos.

#### 4.2.11 Japão

No Japão, a partir de meados de 2015 o governo japonês estabeleceu um roteiro para tratamento das questões relacionadas ao fim da vida útil de sistemas fotovoltaicos. O Japão foi um dos países pioneiros globalmente a estabelecer a responsabilidade estendida do produtor em relação a questão dos REEE (FORTI *et al.*, 2020).

Em 2017, a *Japan Photovoltaic Energy Association* (JPEA) publicou diretrizes sobre como descartar módulos fotovoltaicos em fim de vida útil de maneira adequada. No Japão, é esperado, nos próximos anos, grande número de módulos em fim de vida, fato este que fez que o comitê decidisse estudar com antecedência como seria a gestão mais eficiente do fim de vida dos sistemas fotovoltaicos. A JPEA declarou as regras que não têm exigibilidade, mas é fortemente sugerido que os setores façam uso delas.

Quando comparado com a UE, o Japão encontra-se ainda no processo de definição e desenvolvimento de diretrizes para o manejo e reciclagem segura e eficiente de sistemas fotovoltaicos. Por outro lado, este país está bem avançado quando o assunto é tecnologia para reciclagem de módulos fotovoltaicos, o que pode ser um diferencial para o Japão no futuro.

## 5 A REGULAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei Federal 12.305 de 02 de agosto de 2010 e inicialmente regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404 de 23 de dezembro de 2021. Esta Lei é o principal marco regulatório para o Brasil quando a matéria tratada é resíduo sólido. A Lei contém 57 artigos que dispõem sobre o objeto, princípios, objetivos, conceitos, instrumentos, hierarquias, classificação dos resíduos, responsabilidades dos atores, planos de resíduos sólidos, gestão de resíduos, instrumentos econômicos e das proibições. A Lei estabelece atribuições a todos os entes federados e aos particulares como cidadãos e empresas.

Embora a PNRS seja considerada o marco histórico da questão do tratamento dos resíduos sólidos no Brasil, a Lei 12.305/2010 levou cerca de 20 anos para ser elaborada. Segundo Nascimento Neto e Moreira (2010), registros remontam que desde a década de 1980 já se discutia a respeito do assunto. O Projeto de Lei (PL) 203/1991 que tratava de resíduos dos serviços de saúde é considerado a primeira iniciativa para se elaborar uma lei que tratasse do tema. Em 1991 centenas de outros Projetos de Lei, que tratavam de temas semelhantes, foram apensados ao Projeto de Lei 203/9, no entanto a falta de consenso fez que o projeto não evoluísse e acabou não sendo apreciado no Congresso Nacional.

A segunda tentativa para se construir a PNRS veio em 1998 com a constituição de um grupo de trabalho no CONAMA que elaboraram a Proposição CONAMA 259/99 – Diretrizes Técnicas para a Gestão de Resíduos Sólidos. Embora esta proposição tenha sido aprovada pelo plenário do CONAMA, ela nunca entrou em vigor. Pressão da sociedade civil no início dos anos 2000 coloca a discussão novamente em voga. Porém, novamente a falta de consenso travou o processo de elaboração da lei. Em 2005 foi criado um grupo de trabalho na Secretaria de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente com a missão de consolidar as mais variadas discussões, em cenário Nacional, relacionadas ao tema. O material deste grupo de trabalho resultou na elaboração do Projeto de Lei nº 1991/07 – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Foram então aglutinados vários Projetos de Lei, que tratavam do mesmo tema em comum, de tal forma que em 10 de março de 2010 o Plenário da Câmara dos deputados vota o PL. Finalmente em 02 de agosto de 2010 a Lei 12.305/2010 é sancionada pelo Presidente da República.

Anteriormente ao advento da Lei 12.305/2010, as questões relacionadas



aos resíduos sólidos no Brasil eram tratadas em uma série de Leis Federais, referente ao tema ambiental. No entanto, a falta de princípios, conceitos, definições, instrumentos específicos e responsabilidades mais bem definidas dificultavam a tomada de decisão e a implementação de ações necessárias para o combate ao descarte irregular de resíduos sólidos gerados. A PNRS supriu essa lacuna, no entanto, as demais Leis anteriormente existentes não deixaram de cumprir seu papel no plano da questão ambiental brasileira, pelo contrário; a atual Lei 12.305/2010 harmoniza-se com todo o aparato legal anterior a promulgação da Lei 12.305/2010. Dentre estas Lei destacam-se: Lei 6.938/1981 que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, Lei 9.605/1998 que dispõe sobre os crimes ambientais, Lei 10.257/2001 que trata do Estatuto das Cidades, Lei 11.445/2007 que dispõe sobre o Saneamento Básico, dentre outros dispositivos legais.

### **5.1 Os resíduos eletroeletrônicos**

O inciso VI do artigo 33 da lei 12305/2010 já estabelece que os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos são obrigados a proceder a implementação de sistemas de logística reversa (BRASIL, 2010).

Art. 33. São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de:

I - agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas;

II - pilhas e baterias;

III - pneus;

IV - óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;

V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;

VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

No entanto, face às características específicas, ao grande volume, que cresce anualmente a taxas maiores que o crescimento da população, é observado, no Brasil, o clamor de setores por uma legislação específica para a questão dos resíduos de produtos eletroeletrônicos, ainda mais porque segundo Forti *et al.* (2020), até 2019

cerca de 71% da população mundial em 78 países eram cobertos por algum tipo de legislação ou regulamentação a respeito do lixo eletrônico, no entanto o Brasil não estava incluído, até então, nesta lista, o que mostrava nosso atraso em relação aos pares internacionais, fazendo-se, portanto, necessário compreender e refletir sobre a questão e debater o problema sobre a necessidade ou não de uma legislação específica a respeito do tema.

Neste sentido, alguns projetos de lei como o projeto 2045/2011 do então Deputado Penna (PV-SP) que dispõe sobre a coleta e a destinação ambientalmente adequada de resíduo eletroeletrônico; projeto de lei 2940/2015 de Felipe Bournier, que institui normas para o gerenciamento e destinação final do lixo eletrônico, este apensado ao PL 2045/2011, dentre outros, no entanto, continuam em tramitação nas casas do congresso.

De concreto mesmo, em 12 de fevereiro de 2020, foi publicado o decreto presidencial número 10.240, que regulamenta o inciso VI do caput do artigo 33 e do artigo 56 da lei 12.305/2010, inaugurado assim a participação do Brasil no rol dos países possuidores de dispositivos normativos ou regulatórios a respeito da questão dos resíduos eletroeletrônicos, neste caso, os de caráter domésticos. Este decreto estabelece normas para a implementação do sistema de logística reversa, obrigatória de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. No entanto, cabe neste decreto a primeira grande questão, em qual conceito se enquadraria os resíduos de sistemas fotovoltaicos, uma vez que estes não se enquadram em nenhum dos incisos que conceituam produtos eletrônicos para o uso domésticos, conforme observa-se nos incisos, XIV, XV e XVI do artigo 3º do referido Decreto Lei (BRASIL, 2020).

XIV - produtos eletroeletrônicos - equipamentos de uso doméstico cujo funcionamento depende de correntes elétricas com tensão nominal de, no máximo, duzentos e quarenta volts;

XV - produtos eletroeletrônicos cinzas ou produtos cinzas - produtos eletroeletrônicos e seus acessórios importados ou comercializados de forma não oficial, não autorizado ou não intencional pelo fabricante original;

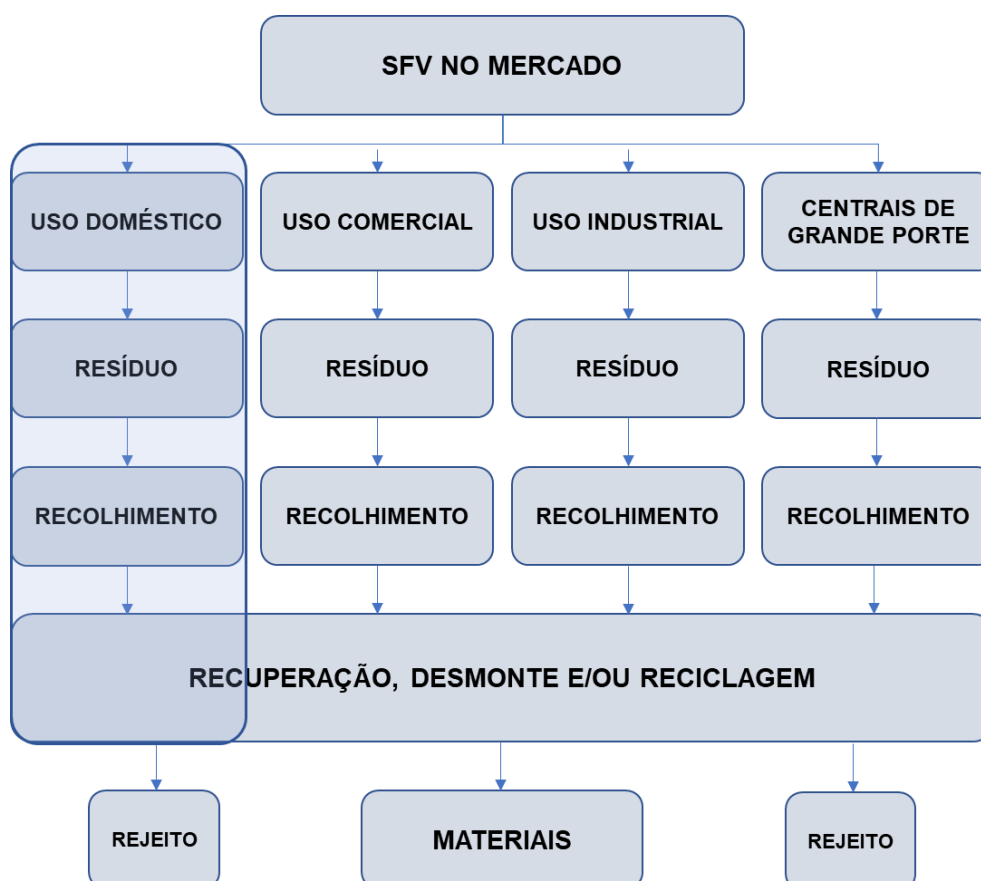
XVI - produtos eletroeletrônicos órfãos ou produtos órfãos - produtos eletroeletrônicos e seus acessórios cujo fabricante ou importador deixou de existir no mercado atual;

Como é de conhecimento do corpo técnico do setor, um módulo fotovoltaico se enquadra no conceito estabelecido no inciso XIV (uma vez que a tensão elétrica

está no patamar de 40 V), no entanto, em um painel (associação dos módulos) a tensão elétrica pode alcançar níveis até superiores a 1000 V. Excluindo a questão técnico-conceitual, os painéis fotovoltaicos estão incluídos na lista anexa do referido Decreto Lei, para equipamentos eletroeletrônicos de uso domésticos, objetos de logística reversa.

De certa forma, o Brasil adotou a mesma estratégia praticada na Europa, através de sua diretiva 2012/19, não estabelecendo um objeto legal exclusivo para a questão fotovoltaica, mas o incluindo no bojo legal dos resíduos eletroeletrônicos em geral para uso doméstico. No entanto, o Decreto Lei 10240 responde somente a um segmento desta questão. Conforme pode ser visto na Figura 22, o decreto lei 10240 responde a somente um segmento de todo o fluxo dos sistemas fotovoltaicos no mercado.

**Figura 22** - Fluxo do uso de sistema fotovoltaicos



Fonte: Autor (2021)

O Decreto 10.240/2020, o qual regulamenta e estabelece regras para a implementação de sistema de logística reversa de eletroeletrônicos de uso doméstico

no território brasileiro, deverá tornar-se o principal dispositivo aliado para a implementação, daquele que é um dos principais instrumentos da PNRS, a logística reversa, uma vez que objetiva a implementação, estruturação e operacionalização de toda a cadeia da logística reversa dos REEE, estabelecendo a obrigatoriedade das empresas em implementarem sistemas de coleta e tratamento adequado quanto às destinações dos REEE para uso doméstico. No entanto, conforme já mencionado, não estão incluídos os resíduos eletroeletrônicos de uso não doméstico, ou seja, todos os demais resíduos gerados na indústria, de uso por profissionais, de serviços de saúde, grandes geradores etc.

A operacionalização do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos deverá atender a 4 etapas básicas, quais são:

1 - Descarte, pelos consumidores, dos produtos eletroeletrônicos em pontos de recebimento definido pela empresa;

2 - Recebimento e armazenamento temporário dos produtos eletroeletrônicos descartados em pontos de recebimento;

3 - Transporte adequado dos produtos eletroeletrônicos descartados dos pontos de coleta até os pontos de destinação, quando necessário;

4- Destinação final ambientalmente adequada.

O Novo decreto estabelece uma série de obrigações e responsabilidades entre todos os atores (com níveis distintos de responsabilidade para todos: fabricantes, importadores, comerciantes e consumidores) integrantes do ciclo do fim de vida útil dos produtos eletroeletrônicos, dentre estes atores incluídos os consumidores, que são obrigados a segregar e separar os REEE das outras frações de resíduos e descartar adequadamente os REEE, dentre outras ações.

Para o caso específico dos fabricantes e importadores as obrigações destes estão descritas nos artigos 33 (fabricantes) e 34 (importadores) conforme a seguir (BRASIL, 2020).

I - dar destinação final ambientalmente adequada, preferencialmente para reciclagem, a cem por cento dos produtos eletroeletrônicos que forem recebidos pelo sistema;

II - informar ao Grupo de Acompanhamento de Performance os critérios objetivos para a realização do cálculo do balanço de massa de produtos eletroeletrônicos, observados os parâmetros estabelecidos no art. 48, especialmente: a estimativa do peso médio unitário de cada um dos produtos eletroeletrônicos de que trata este Decreto comercializados no mercado interno no ano-base de 2018; e a atualização periódica das estimativas de que trata a alínea "a" de

acordo com a evolução do peso dos produtos em diferentes anos-base;

III - participar da execução dos planos de comunicação e de educação ambiental não formal; e

IV - disponibilizar aos órgãos integrantes do Sisnama, quando solicitado, o relatório para verificação do cumprimento das ações de sua responsabilidade previstas neste Decreto, resguardado o sigilo das informações, mediante solicitação e justificativa.

Parágrafo único. As obrigações dos fabricantes e dos importadores de produtos eletroeletrônicos participantes de sistema de logística reversa coletivo serão cumpridas por meio de entidades gestoras, em conformidade com instrumento jurídico aplicável.

Já o artigo 34 fala exclusivamente de responsabilidades dos importadores

Art. 34. São obrigações dos importadores no âmbito do sistema de logística reversa de que trata este Decreto:

I - participar de um sistema de logística reversa como requisito de conformidade para a importação e comercialização dos produtos eletroeletrônicos; e

II - fazer constar da Declaração de Importação para as autoridades competentes, a informação do responsável por estruturar, implementar e operacionalizar o sistema de logística reversa do importador, como requisito para concessão da licença de importação de produtos eletroeletrônicos.

No caso específico dos distribuidores as responsabilidades estão descritas no artigo 35 do referido decreto (BRASIL, 2020).

Art. 35. São obrigações dos distribuidores no âmbito do sistema de logística reversa de que trata este Decreto:

I - incentivar, por meio de suas entidades representativas ou por meio de acordos ou contratos, a adesão às entidades gestoras ou à participação individual ao sistema de logística reversa dos estabelecimentos varejistas que façam parte de sua cadeia comercial;

II - informar aos estabelecimentos varejistas que façam parte de sua cadeia comercial sobre o processo de operacionalização do sistema de logística reversa;

III - disponibilizar ou custear os espaços físicos para os pontos de consolidação a serem utilizados no sistema de logística reversa, observados os requisitos do manual operacional básico; e

IV - disponibilizar, quando solicitado pelos órgãos integrantes do Sisnama, relatório para verificação do cumprimento das ações de sua responsabilidade previstas neste Decreto, resguardado o sigilo das informações, mediante solicitação e justificativa.

Parágrafo único. As obrigações dos distribuidores de produtos eletroeletrônicos participantes de sistema de logística reversa coletivo poderão ser cumpridas por meio de entidades gestoras, em conformidade com instrumento jurídico aplicável

Finalizando, as obrigações dos comerciantes estão descritas no artigo 36, conforme a seguir (BRASIL, 2020):

Art. 36. São obrigações dos comerciantes no âmbito do sistema de logística reversa de que trata este Decreto:

I - informar aos consumidores, nos pontos de recebimento, acerca das responsabilidades de que trata o Capítulo VIII;

II - receber, acondicionar e armazenar temporariamente os produtos eletroeletrônicos descartados pelos consumidores nos pontos de recebimento e efetuar a devolução destes produtos aos fabricantes e aos importadores, observados os requisitos do manual operacional básico e do instrumento formal firmado com a entidade gestora ou com a empresa;

III - participar da execução dos planos de comunicação e de educação ambiental não formal; e,

IV - disponibilizar aos órgãos integrantes do Sisnama, quando solicitado, relatório para verificação do cumprimento das ações de sua responsabilidade previstas neste Decreto, resguardado o sigilo das informações, mediante solicitação e justificativa.

§ 1º As empresas prestadoras de serviços de telefonia móvel que comercializam os produtos eletroeletrônicos de que trata este Decreto estão sujeitas às mesmas obrigações dos comerciantes.

§ 2º As obrigações previstas no caput aplicam-se às empresas que comercializam produtos eletroeletrônicos em lojas físicas, em vendas à distância e por meio de comércio eletrônico.

§ 3º As obrigações dos comerciantes de produtos eletroeletrônicos participantes do modelo coletivo de logística reversa poderão ser cumpridas em parceria com entidades gestoras, em conformidade com instrumento jurídico aplicável.

A estruturação e implementação do sistema de logística reversa deverá ocorrer dentro de um prazo de 5 anos, contados a partir da data de publicação do Decreto, conforme descrito no artigo 49 do mencionado Decreto-Lei. O prazo para implementação foi dividido em duas fases. Sendo uma fase inicial, chamada fase 1 que se iniciou com a publicação do Decreto e foi até 31 de dezembro de 2020.

Nesta fase deverá ocorrer a adesão dos fabricantes, importadores, comerciantes e distribuidores às entidades gestoras. As empresas deverão estruturar o sistema de forma individual ou através de entidade gestora, instituição do mecanismo financeiro para garantir a sustentabilidade econômica do sistema de logística reversa. Outro marco importante para esta fase é a criação do Grupo de Acompanhamento de Performance o qual possui o objetivo de acompanhar e divulgar a implementação do sistema, sendo formado por entidades representativas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes. Foi também incluída nesta fase a manifestação favorável do Ministério do economia em apoio às medidas fiscais de simplificação da operacionalização de transporte e remessa entre estados para destinação final ambientalmente adequada de produtos eletroeletrônicos (BRASIL, 2020) e dentre outras, do apoio do Ministério do Meio Ambiente, junto aos órgão

ambientais competentes, para a simplificação dos processos que possibilitem as medidas de facilitem a criação de pontos de recebimentos e consolidação de REEE nos estados.

A fase 2 teve seu marco inicial em 1º de janeiro de 2021 e deverá promover a habilitação dos prestadores de serviços que poderão desenvolver atividades no sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos; a elaboração dos planos de comunicação e educação ambiental não formal, e instalação de pontos de recebimento e consolidação, dentre outras ações.

Foi estabelecido também um cronograma para atendimento de metas de coleta de REE conforme a Tabela 5.

**Tabela 5** - Cronograma para atendimento das metas de coleta e REE

Ano sequencial	Ano calendário	Percentual de coleta
1	2021	1%
2	2022	3%
3	2023	6%
4	2024	12%
5	2025	17%

Fonte: Autor, adaptado de Decreto Lei 10240/20 (2020)

O artigo 65 do Decreto-Lei traz a questão da hipótese das sujeições a sanções administrativas, civis e penais, no caso de descumprimento, sem justa causa, das obrigações estabelecidas no Decreto.

Quanto a questão dos recursos financeiros para a manutenção do sistema de logística reversa estão descritos do capítulo 16 ao 18. o Decreto prevê que as empresas repassarão de forma proporcional, às entidades gestoras, os recursos financeiros necessários a manutenção do sistema. O financiamento deverá cobrir todas as fases da operação do sistema de logística reversa, os recursos serão fixados de forma diferenciada para cada produto, com base em critérios técnicos.

Para finalizar, é apresentada, de forma sucinta, no quadro da Tabela 6, um resumo comparativo entre a condução da logística reversa de REEE no Brasil e UE.

**Tabela 6** - Comparativo da logística reversa de REEE entre Brasil e UE

<b>Região</b> <b>Fator avaliado</b>	<b>Brasil</b>	<b>União Europeia</b>
<b>Existência de fundo gestor</b>	Não existe um fundo, mas sim entidade(s) gestora(s)	Associação de fabricantes
<b>Infraestrutura</b>	Não totalmente implantada, apenas metade dos estados da Federação possui pontos de coletas	Em grande parte dos Estados Membro
<b>Financiamento</b>	Fabricantes pagam taxas diretamente a entidade gestora. Não aplicável ainda aos RSV	Taxas de fabricantes e consumidores
<b>Legislação específica</b>	Lei de resíduos sólidos e Decretos regulamentadores	Diretiva específica que dever ser incorporada a legislação interna do respectivo Estado Membro
<b>Princípio orientador</b>	Responsabilidade compartilhada	Responsabilidade estendida do produtor

Fonte: Autor (2021)



## 6 CONCLUSÃO

A fonte de energia solar fotovoltaica cresce a taxas bastante expressivas no Brasil, semelhante ao que se observa em outros países. No entanto, assim como as demais formas de energia, a energia de SFV possui seus problemas característicos. O que antes era visto como uma fonte de energia ecologicamente correta, começou a demonstrar seu lado questionável sobre o que se fazer com os RSFV. A questão já é tratada por nações pioneiras na produção de energia através de SFV, e quando se pensa em um processo de descarbonização do planeta a tendência é o agravamento do problema.

A Necessidade humana para transformar e utilizar energia sempre causa certo nível de impacto no ambiente. Em se tratando de SFV, a produção dos equipamentos exige materiais, energia e resíduos são produzidos no fim de seu ciclo operacional, no entanto, o maior problema não reside no volume de resíduos produzidos, mas sim no volume de resíduos que não é tratado de forma adequada, assim como acontece com os demais REEE, e este problema é potencializado à medida que a sociedade ascende economicamente, regiões mais desenvolvidas produzem mais REEE que regiões menos favorecidas.

No cenário brasileiro, embora o país ainda esteja em uma fase incipiente de implantação de SFV, estimativas apontam para volumes consideráveis de RSFV no fim de um período de 30 anos, aumentando ainda mais o volume total per capita de REEE gerados no Brasil. Portanto, merece ser avaliado com bastante cuidado, face ao seu crescimento, os potenciais impactos do uso da fonte de energia solar fotovoltaica. Muito embora, sejam evidentes os benefícios do uso da energia solar fotovoltaica, o descarte descontrolado destes sistemas em fim de vida útil pode causar sérios danos ao ambiente e manchar a imagem que se tem desta tecnologia para se produzir energia elétrica.

O advento do Acordo Setorial para equipamentos elétricos e eletrônicos, faz com que a problemática dos REEE seja tratada em parte. Este Acordo Setorial lista uma série de equipamentos e dispositivos elencados em um rol que são objetos de logística reversa por parte dos responsáveis, no entanto, sistemas fotovoltaicos ainda não fazem parte deste Acordo Setorial, evidenciando uma oportunidade futura para adequação da indústria fotovoltaica no Brasil.

Quando vislumbrado um futuro próximo, ganhos com tratamento dos RSFV

são uma possibilidade bastante razoável, no entanto, será necessário investimento por parte do poder público e do setor privado no sentido de desenvolver o setor com a implementação de infraestrutura adequada para implantação de sistema de coleta, armazenagem e tratamento do RSFV, desenvolvimento de mão de obra capacitada em todos os níveis de instrução, e desenvolvimento de pesquisa e tecnologia visando a obtenção de processos de reciclagem mais eficientes e seguros, além de serem economicamente rentáveis.

Interessante frisar, que para toda estrutura funcionar é necessário recursos financeiros, e para a questão da tratativa da gestão dos resíduos fotovoltaicos não seria diferente. O Decreto 10.240/20 estabelece que a responsabilidade pelo financiamento do sistema de logística reversa é dos produtores de equipamentos, no entanto, não está claro como deverá ser realizada a garantia futura de equipamentos órfãos. É oportuno lembrar que os mecanismos de financiamento aplicados na UE, mais precisamente na Alemanha, suportam toda a cadeia futura desde o descarte até o processamento do material reciclado ou recuperado. É prudente considerar no Brasil a possibilidade de os novos geradores financiarem, ao menos de forma parcial, a cadeia futura da gestão do fim do ciclo de vida útil desses sistemas. Uma espécie de fundo para desenvolvimento da indústria de reciclagem de sistema fotovoltaicos seria bem-vindo, uma vez que os processos de reciclagem mais eficientes são cobertos por patentes e o desenvolvimento de tecnologia própria traria ganhos significativos para a indústria brasileira. Neste aspecto, um tema não deve ser deixado de lado, é fundamental que o Brasil reflita sobre a questão do desenvolvimento de mão de obra qualificada em todos os níveis de educação, para o tratamento de resíduo sólido ou mais especificamente para o tratamento de REEE. Nações como a Índia, por exemplo, já possuem iniciativas neste sentido, como a implementação de cursos a nível superior relacionados ao tratamento de resíduos sólidos.

Em relação a legislação sobre a questão dos RSFV, a União Europeia está na vanguarda mundial quando o assunto é o aspecto regulatórios dos REEE, no sentido de definição dos papéis dos responsáveis e dos mecanismos de financiamento do sistema de coleta e tratamento dos REEE, bem como para o estabelecimento de metas.

Em relação à legislação brasileira sobre a questão dos REEE e consequentemente dos RSFV, muito embora o país possua uma lei que trata exclusivamente da questão dos resíduos sólidos (Lei 12305/2010), somente cerca de

10 anos após a Lei ser sancionada é que foi regulamentado inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305/10, e complementa o Decreto nº 9.177, de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso domésticos, fazendo-se referência, neste Decreto, aos módulos fotovoltaicos, no entanto, a tratativa é somente para dimensão doméstica, ficando as demais dimensões sobre a responsabilidade dos respectivos geradores. Embora a reponsabilidade seja dos geradores, a criação de um dispositivo legislativo para esta matéria, quando focada no uso não doméstico, traria padronização de ações entre as partes envolvidas, não deixando a critério de cada parte as ações necessárias, neste sentido entende-se que até mesmo processos de fiscalização poderiam ser facilitados uma vez que fossem explicitas as ações necessárias.

Finalizando, é de suma importância que os instrumentos e as políticas que vierem a ser criadas no Brasil sejam claras, eficientes e eficazes com a definição de responsabilidades de todos os atores de forma a garantir o propósito fundamental da geração de energia solar fotovoltaica, que é de ser uma fonte de energia sustentável. Como é de conhecimento, o Brasil possui sua política nacional de resíduos sólidos através da Lei 12305/10, e o seus decretos regulamentadores, dentre eles os Decretos 9.177/17 e 10.240/20, no entanto face às suas características peculiares, torna-se mister o desenvolvimento de legislação específica a respeito do tema resíduo eletroeletrônico e, fundamentalmente, dos resíduos de sistemas fotovoltaicos, o qual tenderá a crescer de forma exponencial nas próximas décadas.

## 7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do trabalho ora apresentado deixa uma certeza: a discussão sobre o tema apresentado é bastante ampla, uma vez que há muitas possibilidades de exploração de questões que envolvem o assunto abordado. Como sugestão são descritas algumas propostas para trabalhos futuros que possam tratar do tema dos RSFV:

- ✓ Avaliação da cadeia de negócios gerados no processo de logística reversa de módulos fotovoltaicos;
- ✓ Avaliação das técnicas de desmonte para reciclagem de módulos fotovoltaicos;
- ✓ Avaliação da infraestrutura necessária para o efetivo processo de coleta, preparação e reciclagem dos REEE nas cidades brasileiras.
- ✓ Estudo de viabilidade econômica de uma indústria para reciclagem de módulos fotovoltaicos;
- ✓ Impactos ambientais e a saúde humana provocados pelo descarte inadequado de RSFV;
- ✓ Proposta de um acordo setorial para a logística reversa de RSFV;
- ✓ Proposta para elaboração de grade curricular para formação de mão de obra capacitada para a indústria de reciclagem de REEE.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ANEEL. **Geração distribuída**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 03 jun. 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp). Acesso em: 09 jun. 2021.

BARRETO, F. E.; BARATA, A. J. Lixo eletrônico: uma análise do descarte nas organizações privadas do Município de São Gabriel, Rio Grande do Sul. **Educação Ambiental em Ação**, v. 16, n. 62. Disponível em: <https://revistaea.org/artigo.php?idartigo=2982>. Acesso em: 01 jun. 2021.

BOWMAN, D. M. *et al.* (2009). Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, apr. 2009.

BRASIL. **Decreto Nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2020. Disponível em <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2020/decreto-10240-12-fevereiro-2020-789763-publicacaooriginal-160002-pe.html>. Acesso em: 26 out. 2021.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

BRASIL. Senado Federal. Resíduos Sólidos, Lixões persistem. **Em Discussão**, p. 48-58, 2014.

CALIFORNIA LEGISLATURE. **Hazardous Waste: Photovoltaic Modules**, Senate Bill No. 489, 2015. An act to add Article 17 (commencing with Section 25259) to Chapter 6.5 of Division 20 of the Health and Safety Code, relating to hazardous waste. Disponível em: [https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill\\_id=201520160SB489](https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160SB489). Acesso em: 20 jun. 2021.

CARVALHO, J. F. de. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 28, n. 82, p. 25-39, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/88917>. Acesso em: 26 nov. 2021.

CETESB. **Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão**. São Paulo: PROCLIMA, Programa Estadual de Mudanças Climáticas, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 05 jun. 2021.

CHOI, J.-K.; FTHENAKIS, V. Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure. **Environmental Science & Technology**, p. 8678-8683, 2010.

COLE, C. *et al.* An assessment of achievements of the WEEE Directive in promoting movement up the waste hierarchy: experiences in the UK. **Waste Management**, v. 87, p. 417-427, 2019.

COMERLATO, F. A baleia como recurso energético no Brasil. *In*: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA AMBIENTAL E MIGRAÇÕES, 1., 2010. **Anais [...]** Florianópolis: LABIMHA, 2010. p. 1130.

DEURSEN, F. V. Antes do carro, o caos das grandes cidades era o cavalo. **Super Interessante**, out. 2019.

DIAS, P. *et al.* Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules. **Waste Management**, v. 57, p. 220-225, 2016.

EIA. **Today in energy**. [S.l.]: Independent Statistics and Analysis, 2019. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41533>. Acesso em: 09 jun. 2021.

ELEKTROG. **ElektroG**: Electrical and electronic equipment Act. [S.l.: s.n.], 2015.

ELSPAß, M.; FELDMANN, F. Environmental law and practice in Germany: overview. **Practical Law**, 2020. Disponível em: [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/4-503-0486?transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/4-503-0486?transitionType=Default&contextData=(sc.Default)&firstPage=true). Acesso em 15 out. 2021.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional - BEN 2021**. Brasília, DF: EPE, 2021. Disponível em [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020\\_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf). Acesso em: 08 jun. 2021.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília, DF: EPE, 2020. disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>. Acesso em: 09 jun. 2021.

ESTADÃO. Energia solar fotovoltaica supera 8 GW e traz R\$ 40 bi de investimentos ao Brasil. **Acionista**, mar. 2021. Disponível em: <https://acionista.com.br/energia-solar-fotovoltaica-supera-8-gw-e-traz-r-40-bi-de-investimentos-ao-brasil/>. Acesso em: jun. 2021.

FORTI, V. *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020**. [S.l.]: United Nations University (UNU), United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme; International Telecommunication Union (ITU); International Solid Waste Association (ISWA). United Nations University/United Nations Institute for Training and Research and the International Telecommunication Union, 2020. Disponível em: <http://ewastemonitor.info/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

GEOSCAN. Minério de Prata: entenda tudo sobre! **Geoscan**, fev. 2021. Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/blog/minerio-de-prata/>. Acesso em 17 jul. 2021.

GOE, M.; GAUSTAD, G. Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback. **Applied Energy**, n. 120, p. 41-48, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.036>. Acesso em: 20 jul. 2021.

GRIFFITH, K. Not so green energy: Hundreds of non-recyclable fiberglass wind turbine blades are pictured piling up in landfill. **Dailymail**, 2020. Disponível em: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-8294057/Hundreds-non-recyclable-fiberglass-wind-turbine-blades-pictured-piling-landfills.html>. Acesso em: 06 jun. 2021.

HUDA, N.; MAHMOUDI, S.; BEHNIA, M. Critical assessment of renewable energy waste generation in OECD. **Resources, Conservation & Recycling**, n. 164, ago. 2020.

IBGE. **Projeções da População**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?edicao=17996&t=downloads>. Acesso em: 30 maio 2021.

IEA. Net Zero by 2050. **RODMAP**, International Energy Agency, 2021. disponível em [www.iea.li/nzeroadmap](http://www.iea.li/nzeroadmap). Acesso em: 10 jun. 2021.

IEA. Renewables. **International Energy Agency**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview>. Acesso em: 08 jun. 2021.

IRENA. **International Renewable Energy Agency**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/>. Acesso em: 09 jun. 2021.

IRENA. Remap Energy Generation and Capacity. **International Renewable Energy Agency**, jun. 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Energy-Transition/REmap-Energy-Generation-and-Capacity>. Acesso em: 09 jun. 2021.

KAZA, S. *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste**. World Bank, Urban Development Series. Washington DC: World Bank, 2018. Disponível em <http://hdl.handle.net/10986/30317>. Acesso em: 26 maio 2021.

KOMOTO, K.; LEE, J.-S. **End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies**. [S.l.]: IEA -International Energy Agency, 2018.

LAUTNUSSA, C. E. *et al.* Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels. **JRC Technical Report**, Eupeam Comission, mar. 2016. doi:10.2788/786252.

LIRA, M. A. *et al.* Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO<sub>2</sub> no Estado do Ceará. **Revsta Brasileira de Metrologia**, v. 34, p. 389-397, jun. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786343046>.

LIU, P.; BARLOW, C. Y. Wind turbine blade waste in 2050. **Waste Managment**, v. 62, p. 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>.

LU, J. **Technical Route Comparison between Multi-Si and Mono-Si via**. [S./]: Solar, 2016. Disponível em: <http://solar.ofweek.com/2016-03/ART-260009-8420-29079640.html>. Acesso em 22 jul. 2021.

LUO, Y. *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition. **Science of the Total Environment**, v. 407, p. 1105-1113, 2009.

MEYER, E. L.; DYK, E. E. Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 53, p. 82-93, mar. 2004.

MINHA CASA SOLAR. Como é feito um painel solar? **Minha Casa Solar**, out. 2019. Disponível em <http://blog.minhacasasolar.com.br/>: <http://blog.minhacasasolar.com.br/como-e-feito-um-painel-solar/>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. D.; SILVA, T. C. Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, p. 364- 383, 2019.

NASCIMENTO NETO, P.; MOREIRA, T. A. Política nacional de resíduos sólidos - reflexões a cerca do novo marco regulatório nacional. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 15, mar. 2010.

ONU. **ONU e o meio ambiente**. [S./]: ONU, 2010. disponível em Nações Unidas Brasil: <https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

PARUJULY, K. *et al.* **Future E-waste Scenarios**. UNEP. Osaka: UNEP IETC, 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014.

POULEK, V. *et al.* Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone. **Solar Energy**, p. 3103-3108, 2012.

RAYBOULD, B. *et al.* An investigation into UK government policy and legislation to renewable energy and greenhouse gas reduction commitments. **Clean**



**Technologies and Environmental Policy**, v. 22, p. 371-387, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01786-x>.

RECICLA SAMPA. Reciclagem de vidro: aprenda como fazer. **Recicla Sampa**, 2018. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/reciclagem-de-vidro:-aprenda-como-fazer>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SHARMA, A.; PANDEY, S.; KOLHE, M. Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, p. 597-610, 2019.

SHARMA, A.; PANDEY, S.; KOLHE, M. Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, v. 8, n. 5, p. 597-610, 2019.

SHELLENBERGER, M. If Solar Panels Are So Clean, Why Do They Produce So Much Toxic Waste? **Forbes**, maio 2018. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/michaelsellenberger/2018/05/23/if-solar-panels-are-so-clean-why-do-they-produce-so-much-toxic-waste/?sh=417bef04121c>. Acesso em: 11 jun. 2021.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, n. 120, p. 549-563, 2021.

SINIR. **Acordo Setorial de Eletroeletrônicos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/component/content/article/2-sem-categoria/474-acordo-setorial-de-eletroeletronicos>. Acesso em: 31 maio 2021.

SINIR. **Logística Reversa**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: <https://sinir.gov.br/logistica-reversa>. Acesso em: 06 jun. 2021.

UNEP. **Guia de Estratégias Nacionais para o Manejo do Lixo**: mudando de desafios para oportunidades. [S.l.]: UNEP, 2013.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho**. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). [S.l.: s.n.], 2012.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho**. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Bruxelas: Jornal Oficial da União Europeia, 2012.

UNIÃO EUROPEIA. **Tratado da União Europeia**. Bruxelas: Jornal Oficial da União Europeia, 2016a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/collection/eu-law/treaties/treaties-force.html#new-2-51>. Acesso em: 10 out. 2021.

UNIÃO EUROPEIA. **Tratado Sobre o funcionamento da União Europeia**. Bruxelas: Jornal Oficial da União Europeia, 2016b. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/collection/eu-law/treaties/treaties-force.html#new-2-52>. Acesso em: 10

out. 2021.

VGR RESÍDUOS. Logística reversa de eletroeletrônicos: o que diz o novo decreto? **Portal VGR Resíduos**, 2020. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/logistica-reversa-de-eletroeletronicos-o-que-diz-o-novo-decreto/>. Acesso em: 28 out. 2021.

VILLALVA, M. Conhecendo o inversor solar fotovoltaico por dentro. **Canal Solar**, fev. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/conhecendo-o-inversor-solar-fotovoltaico-por-dentro/>. Acesso em: 29 out. 2021.

WORLD ECONOMIC FORUM. **A new circular vision for electronics**: time for a global reboot. World Economic Forum, Committed to improving the state of the world. Geneva, Switzerland: Committed to improving the state of the world, 2019.

WORLD ECONOMIC FORUM. Fostering Effective Energy Transition. **Insightreport, World Economic Forum**, 2021.

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

YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. **Solar Energy**, n. 105, p. 669-678, 2014.