

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

LUIZ FABIANO CAMILO VIANA NUNES

**RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UM DEBATE SOBRE AS PREVISÕES
DE GERAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MANEJO ADEQUADO**

**MARACANAÚ
SETEMBRO/2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N972r Nunes, Luiz Fabiano Camilo Viana.
RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: : UM DEBATE SOBRE AS PREVISÕES DE
GERAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MANEJO ADEQUADO / Luiz Fabiano Camilo Viana
Nunes. - 2021.
111 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Aperfeiçoamento de Professores
para a Educação Inclusiva, Campus Maracanaú, 2021.

Orientação: Profa. Dra. Erika da Justa Teixeira Rocha .

1. Energia renovável. 2. Energia fotovoltaica. 3. Reciclagem. 4. Descarte. I. Título.

CDD 371.9

LUIZ FABIANO CAMILO VIANA NUNES

**RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UM DEBATE SOBRE AS PREVISÕES
DE GERAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MANEJO ADEQUADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Geotecnologias Aplicadas às Energias Renováveis.

Orientador: Prof.(a) Dr.(a) Erika da Justa
Teixeira Rocha

MARACANAÚ
SETEMBRO/2021

LUIZ FABIANO CAMILO VIANA NUNES

RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: UM DEBATE SOBRE AS PREVISÕES DE
GERAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MANEJO ADEQUADO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 17/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.(a) Dr.(a) Erika da Justa Teixeira Rocha (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Professor Auzuir Ripardo de Alexandria
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará- IFCE

Prof. Dr. Professor Gemelle Oliveira Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará- IFCE

AGRADECIMENTOS

Aos colegas do mestrado, especialmente a Marcelo Freire De Andrade Neto, que sempre esteve disponível, seja sobre o mestrado seja para uma conversa despreziosa.

A minha orientadora Erika da Justa Teixeira Rocha, pela sensatez e compreensão.

Ao professor Pedro Henrique Augusto Medeiros pela parceria e incentivo.

Ao amigo e engenheiro Fábio Fernandes do Nascimento, tanto pela amizade quanto pela engenharia.

DEDICATÓRIA

A professora Adriana Marques Rocha, pela sua luta pessoal e profissional, que se confundem imensamente.

No futuro, quando as atuais gerações forem cobradas, responsabilizadas por essa caminhada ao abismo, teremos algumas posturas, dentre elas, uma pode trazer equilíbrio:

Os ignorantes, desprovidos de conhecimento, serão imputáveis, como os alienados;

Já os sabidos, mas indiferentes, recairá a culpa: pecamos também, por omissão;

Teremos ainda, os que estando cientes, preferiram o sofrimento dos mais fragilizados em benefício próprio;

Por fim, os que lutaram por um mundo mais justo, um combate digno, mostrando em sua fala e gestos, junto aos seus, publicamente, no trabalho, em casa, pela defesa da necessidade de mudança.

Contudo, prevalecendo o equilíbrio, que a lição não se perca.

Luiz Fabiano Camilo Viana Nunes

RESUMO

Não se constitui novidade os impactos decorrentes do consumo dos recursos naturais diante de uma lógica de fim de linha. À medida que as mudanças climáticas ocorrem, aumentam as pressões sobre os recursos naturais, que são escasseados pela exploração das sociedades consumistas, contribuindo para as mudanças climáticas novamente. Neste contexto, as energias renováveis surgem como resposta à problemas ambientais, como o aquecimento global. No entanto, mesmo sendo ambientalmente mais adequadas, sua geração e consumo apresentam impactos. Uma fonte energética ambientalmente viável, ainda sustenta hábitos do superconsumo, que geram impactos negativos e colocam o destino na humanidade em risco. Ou seja, se a aposta energética para o futuro reside nas energias renováveis, temos que ter a certeza da promoção do equilíbrio ambiental, não basta que seja renovável. Portanto, se imaginarmos as energias renováveis sendo capazes de dilatar os limites do crescimento econômico, outros recursos não seriam mais vorazmente ameaçados? Desta forma, a atual proliferação de painéis solares, e a consequente gestão de resíduos destas placas, terá um custo. Qual? Assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar a destinação de painéis fotovoltaicos após sua vida útil, ou perda precoce, tendo como área de estudo o estado do Ceará, com grande potencial de instalação de sistemas de geração de energia fotovoltaica. Para isto é relevante dimensionar os impactos do descarte de painéis solares para o planejamento do estado. Nisto, o objetivo posto aqui é de, a partir da compreensão do ciclo de vida e da análise do potencial e da capacidade instalada de plantas dedicadas à geração de energia renovável fotovoltaica no Ceará, contribuir com o planejamento e a gestão da infraestrutura energética no que se refere ao descarte das placas fotovoltaicas. Portanto, o desenvolvimento institucional governamental é essencial para apoiar práticas para o fim de vida dos painéis fotovoltaicos, tanto para gestão dos resíduos, como para garantia de um planejamento logístico e de reciclagem, a partir de um sistema de monitoramento, baseado em relatórios que assistam as atividades fotovoltaicas. Tudo isto constitui-se é essencial e deve ser incluído em regulamentos da federação, estados e municípios. Desta forma, o desenvolvimento de indústrias de reciclagem de painéis fotovoltaicos contribuirá para a economia local, que necessita de dados confiáveis da projeção do fornecimento de fluxos de resíduos. A confiabilidade destes dados orientará, não só o mercado de reciclagem, mais também o mercado de painéis secundários e de reparo, como também a extração de matéria-prima, que pode ter a demanda reduzida devido a recuperação na reciclagem. Assim, diante das instalações dispostas no Ceará atualmente, apenas a partir de 2050 teremos um fluxo de resíduos solares para alimentar uma indústria de reciclagem.

Palavras chave: Energia renovável, energia fotovoltaica, reciclagem, descarte.

ABSTRACT

The impacts resulting from the consumption of natural resources are not new in the face of an end-of-line logic. As climate change takes place, pressures increase on natural resources, which are depleted by the exploitation of consumer societies, contributing to climate change again. In this context, renewable energies emerge as a response to environmental problems such as global warming. However, even though they are more environmentally friendly, their generation and consumption have impacts. An environmentally viable energy source, it still sustains overconsumption habits, which generate negative impacts and put humanity's destiny at risk. In other words, if the energy bet for the future resides in renewable energies, we have to be sure of promoting environmental balance, it is not enough for it to be renewable. So if we imagine renewable energy being able to stretch the limits of economic growth, wouldn't other resources be more voraciously threatened? Thus, the current proliferation of solar panels, and the consequent management of waste from these panels, will come at a cost. Which? Thus, this work was developed in order to analyze the disposal of photovoltaic panels after their useful life, or early loss, having as study area the state of Ceará, with great potential for installing photovoltaic energy generation systems. For this, it is relevant to dimension the impacts of the disposal of solar panels for the planning of the state. In this, the objective set here is, from the understanding of the life cycle and the analysis of the potential and installed capacity of plants dedicated to the generation of renewable photovoltaic energy in Ceará, to contribute to the planning and management of the energy infrastructure in which refers to the disposal of photovoltaic plates. Therefore, government institutional development is essential to support end-of-life practices for photovoltaic panels, both for waste management and for ensuring logistical and recycling planning, based on a monitoring system, based on reports that watch photovoltaic activities. All of this is essential and must be included in federation, state and municipal regulations. In this way, the development of photovoltaic panel recycling industries will contribute to the local economy, which needs reliable data on the projection of the supply of waste streams. The reliability of these data will guide not only the recycling market, but also the market for secondary and repair panels, as well as the extraction of raw material, which may have reduced demand due to recovery in recycling. Thus, given the facilities available in Ceará today, only from 2050 will we have a flow of solar waste to feed a recycling industry.

Keywords: Renewable energy, photovoltaic energy, recycling, disposal.

LISTA DE FIGURAS

	Figura	Página
1	Concentrador solar de Augustin Mouchot na Exposição Universal de Paris, 1878.	22
2	Localização das usinas fotovoltaicas brasileiras	34
3	Telhados residenciais com potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos	40
4	Áreas para instalação de energia fotovoltaica em grande escala no Ceará	41
5	Mapa da média anual diária da irradiação solar global no plano inclinado	59
6	Áreas aptas para implantação de centrais fotovoltaicas (fazendas solares) no Brasil	59
7	Composição dos painéis solares	61
8	Fluxograma do nexos de interações para o descarte	84

LISTA DE GRÁFICOS

	Gráfico	Página
1	Emissões e aquecimento esperado até 2100	25
2	Quantidade de eventos climáticos extremos	25
3	Emissão de CO ₂ anual do Brasil em milhões de toneladas métricas	26
4	Emissão de CH ₄ anual do Brasil em milhões de toneladas métricas	26
5	Consumo de carvão e energias renováveis nos EUA (1776-2019) Quatrilhão de unidades térmicas britânicas (quads)	27
6	Matriz energética do sistema interligado brasileiro em 2014	32
7	Tendências de investimento em energia renovável	35
8	Unidades consumidoras com geração solar fotovoltaica distribuída	37
9	Geração de eletricidade solar fotovoltaica, Mundo 1990-2018	38
10	Projeção da participação de mercado por tecnologia fotovoltaica.	39
11	Custos da geração fotovoltaica	44
12	Projeção de volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para a Alemanha até 2050	46
13	Projeção de volume de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para o Reino Unido até 2050.	48
14	Projeção de volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida para o Japão até 2050	49
15	Projeção de volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida para os EUA até 2050	50
16	Volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para a China até 2050	50
17	Projeção de volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida esperados para a Índia até 2050	51
18	Capacidade instalada para geração fotovoltaica no Brasil (MW)	52
19	Visão geral das projeções globais de resíduos do painel fotovoltaico, 2016-2050	56
20	Participação no mercado dos painéis solares por grupo de tecnologia, 2014–2030.	63
21	Estimativa dos volumes de resíduos globais (milhões de toneladas) de painéis fotovoltaicos em fim de vida	73
22	Volumes de resíduos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida pelos cinco principais países até 2050 dividido por cenário de perda precoce (topo) e cenário de perda regular (parte inferior)	74

23	Resíduos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida por tonelada no Brasil	74
24	Importação de módulos fotovoltaicos - 1 semestre 2020	76
25	Projeção do crescimento da potência outorgada de energia solar fotovoltaica	77
26	Resíduos solares (Placas Fotovoltaicas) das usinas em operação no Ceará (2012-2050)	78
27	Geração Distribuída (GD) na própria Unidade Consumidora (UC) em KW	79
28	Resíduos (Placas Fotovoltaicas) da Geração Distribuída (2014-2051)	79
29	Resíduos Geração Centralizadas x Geração Distribuída	80

LISTA DE TABELA

	Tabela	Página
1	Empreendimentos fotovoltaicos no Ceará por proprietário	36
2	Estratégias de design através do ciclo de vida	54
3	Resumo sobre os componentes dos módulos	62
4	Relação dos tipos de painéis solares, potência e valor comercial médio	63
5	Resumo das principais características da reciclagem Linha de Base e PRFA	66
6	Processos de reciclagem de painéis solares de silício	67
7	Tecnologias de reciclagem para painéis fotovoltaicos	70
8	Concentrações permitidas de lixiviado para um material residual	71
9	Projeção de peso e volume dos resíduos fotovoltaicos para o Ceará	76
10	Geração Distribuída (GD) na própria Unidade Consumidora (UC) em KW	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a-Si	Painel solar de silício amorfo
CdTe	Painel solar de telureto de cádmio
NREL	Laboratório Nacional de Energia Renovável
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
ADB	Asian Development Bank
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMOC	Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia
ATP	Adenosina trifosfato
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEGÁS	A Companhia de Gás do Ceará
CIGS	Painel solar de seleneto de cobre, índio e gálio
COEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU	União Européia
EUA	Estados Unidos da América
EVA	acetato-vinilo de etileno
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GWh	Gigawatt-hora
IEA	Agência Internacional de Energia.
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
kWh	Quilowatt-hora
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MWh	Megawatt-hora
NIS	Sistema Interligado Nacional
NOAA	National Centers for Environmental Information
NREL	National renewable energy laboratory
°C	Graus Celsius
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
OPV	Célula fotovoltaica orgânica
Pmax	Máxima Potência Nominal
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ppm	parte por milhão
PRFAE	Reciclagem Fotovoltaica de Alta Eficiência
PSCs	Células solares de perovskitas
PV	Fotovoltaico
Quads	Quatrilhão de unidades térmicas britânicas
REE	Resíduos Eletro Eletrônicos
TWh	Terawatt-hora
UFC	Universidade Federal do Ceará
USD	Dólar americano

Sumário

1)	Introdução	15
2)	Justificativa	17
2.1	Por que renovar as fontes energéticas?	17
2.2	O descarte dos resíduos fotovoltaicos	19
3)	Objetivos	19
3.1	Objetivos específicos	19
4)	Fundamentos Teóricos	20
4.1	Humanidade e energia	20
4.2	A questão climática e a migração para energias renováveis	24
4.3	As fontes de energia renováveis	27
4.4	O que é a política para as energias renováveis	29
4.5	A economia diante das energias renováveis	31
4.6	O Princípio da Responsabilidade	32
4.7	A energia fotovoltaica	34
4.8	A expansão	36
4.9	As diferentes tecnologias fotovoltaicas	38
4.10	A geração	40
4.11	Custos e criação de valor	42
4.12	Abordagem regulatória em diferentes mercados	43
a)	União Européia (UE)	45
b)	Alemanha	46
c)	Reino Unido	47
d)	Japão	48
e)	EUA	49
f)	China	50
g)	Índia	51
h)	Brasil	52
4.13	Análise do ciclo de vida	53
4.14	Nexo água-energia	57
5)	Metodologia	58
5.1	Área de estudo	58
5.2	Os equipamentos fotovoltaicos	60
5.3	Os materiais e a possibilidade de reciclagem	64
5.4	A reciclagem	66

5.5	Obsolência precoce.....	70
5.6	Toxidade	71
5.7	Fonte de receita.....	72
5.8	Disponibilidade materiais e resíduos energéticos solares.	73
5.9	Análise do Ciclo de Vida (ACV).....	75
5.10	Logística reversa	80
5.11	Um sistema de gestão e financiamento.....	82
5.12	Nexo	83
6)	Resultados e Discussões	86
7)	Conclusões e recomendações	91
8)	Referências.....	93
	Anexo	108

1) Introdução

De um mundo verde e azul para o shopping center como habitat.

Conhecer a história constitui-se uma condicionante, uma exigência, para o planejamento. Quanto mais conhecemos do passado mais ao longe planejamos o futuro. Portanto, se não se compreender de onde partimos dificilmente se fará sentido do que vislumbramos de novo (Gago, 2003)

Diógenes, filósofo da Grécia Antiga que vivia em um barril, foi visitado por Alexandre Magno, o Grande. Alexandre então perguntou ao filósofo se havia alguma coisa que pudesse fazer por ele? Diógenes respondeu: Sim, há algo que pode fazer, por favor, vá um pouco para o lado, você está tapando meu sol.

O sol é a grande e incontestável fonte de energia do planeta. É ele, ao aquecer a terra, que coloca em movimento os oceanos e os ventos. Converter essa energia solar em benefício próprio foi um dos marcos do desenvolvimento humano. A fotossíntese já é o resultado dessa conversão para as espécies vegetais. Restavamos, enquanto espécie, que chegou ao topo da cadeia alimentar em velocidade vertiginosa, tornar essa conversão mais eficiente para atender nossa demanda expansionista de energia.

Assim, posto o sol, agora a serviço da humanidade, poderá saciar as necessidades do voraz consumo humano?

O professor de Física, Philip Morrison, entrava em sala de aula na Universidade de Cornell (EUA), no final dos anos de 1950, com uma cópia do New York Times, ele dizia: “Esses economistas são inconscientes, anunciando orgulhosamente o aumento prodigioso do Produto Interno Bruto da nação. Com essa taxa, diziam os economistas, dobraremos o consumo de energia em dez anos. Sobre isto, concluía o professor, eles não se dão conta de que, nesse ritmo, consumiremos daqui a 150 anos tanta energia quanto o sol e, em mil anos, tanta energia quanto as galáxias do universo (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006).

Não se constitui novidade os apontamentos sobre os impactos decorrentes do consumo descontrolado dos recursos naturais diante de uma lógica de fim de linha, em que, findando a vida útil, ocorre o descarte, e mais recurso natural é processado para gerar novo produto. No entanto, um sistema econômico projetado com a intenção de que seja extraído o máximo possível dos recursos e o mínimo desperdício seja gerado para descarte, característico da economia circular (Deutz, 2020), não significa a perfeita harmonia entre produção e as dinâmicas ambientais naturais.

Um crescimento exponencial, a partir da exploração dos recursos naturais finitos, é insustentável. Tem-se consolidado uma visão geral dos limites do crescimento, vinculada as mudanças climáticas, perda de biodiversidade (Butler, Colin D. et al, 2019).

À medida que as mudanças climáticas ocorrem, de intrínseca relação antropogênicas, aumentam as pressões sobre os recursos naturais, ou melhor, trata-se de uma terrível relação dialética, em que os recursos são escasseados pela exploração das sociedades consumistas, esta exploração desenfreada dos recursos naturais contribui para as mudanças climáticas. Por sua vez, as mudanças climáticas, novamente, aumentam a pressão sobre os recursos naturais.

As energias renováveis surgiram como resposta à problemas ambientais, como o aquecimento global, mas, mesmo sendo ambientalmente mais adequadas, sua geração e consumo apresentam impactos. Uma fonte energética ambientalmente viável, ainda sustenta hábitos do superconsumo, que geram impactos negativos e colocam o destino na humanidade em risco. Ou seja, se a aposta energética para o futuro reside nas energias renováveis, tem-se que ter a certeza da promoção do equilíbrio ambiental, não basta que seja renovável. Portanto, ao se imaginar, as energias renováveis, sendo capazes de dilatar os limites do crescimento econômico, outros recursos não seriam mais vorazmente ameaçados?

Neste contexto, por exemplo, sobre as usinas nucleares, Revees (2006), disse: o custo total da gestão dos resíduos continua desconhecidos. Amanhã, nós e nossos descendentes continuaremos a pagar esses KWh nucleares já consumidos (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006).

Desta forma, a atual proliferação de painéis solares, e a conseqüente gestão de resíduos destas placas, terá um custo. Qual?

Somente em 2015, em uma conferência realizada em Dubai, os palestrantes e apresentações do painel abordaram diretamente os desafios do lixo eletrônico em toda a rede solar fora da indústria, levando a um amplo apelo por ação do setor. Em seu relatório, durante o evento, a *Global Off Grid Lighting Association* apresentou vários passos que incluíram: um compromisso contínuo de formação de processos regulatórios para reciclagem; a construção de ligações entre reparação e reciclagem e desenvolvimento de um entendimento sobre a valoração dos resíduos solares (GOGLA, Conference Report, 2015).

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar a destinação de painéis fotovoltaicos após sua vida útil, ou perda precoce, tendo como área de estudo o estado do Ceará e estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1, introdução, estabelece-se a relação entre o desenvolvimento humano e consumo crescente de energia, explorando desde a fotossíntese até as energias renováveis, quais as implicações decorrentes deste desenvolvimento.

No capítulo 2, justificativa, evidencia-se a necessidade planejar o descarte dos materiais oriundos da energia fotovoltaica a partir das disponibilidades e incentivos para esta modalidade de geração no Ceará.

No capítulo 3, objetivos, propõe-se a compreensão do ciclo de vida e da análise da capacidade instalada e o potencial de instalação de plantas dedicadas à geração de energia renovável fotovoltaica no Ceará, para vias de descarte.

No capítulo 4, fundamentos teóricos, tem-se a projeção da energia solar fotovoltaica, as implicações políticas e econômicas desta projeção na transição das energias de origem fóssil para energias renováveis. Busca-se compreender quais princípios norteiam a responsabilidade com o descarte dos materiais solares e como alguns mercados mundiais estão tratando esta questão. Outro aspecto tratado fere-se ao modo como a metodologia de análise de ciclo de vida e o conceito de nexos contribuem para esta discussão.

No capítulo 5, metodologia, a discussão se torna mais íntima da proposta de descarte, apresentando os equipamentos fotovoltaicos e as implicações para o descarte.

No capítulo 6, resultados e discussões, vê-se uma discussão baseada nos tópicos apresentados ao longo do texto.

No capítulo 7, tem-se as conclusões e recomendações de trabalhos futuros.

No capítulo 9, por fim, as referências bibliográficas.

2) Justificativa

As pesquisas sobre os resíduos de sistemas baseados em energia solar, especificamente sobre as placas fotovoltaicas, são recentes. Os impactos decorrentes do uso desta fonte energética apresentam possibilidades ambientais globais, quando surgem como alternativa ao consumo de combustível de origem fóssil. É necessário a elaboração de um planejamento que projete a situação de descarte destes materiais. Portanto, uma avaliação em conjunto, da íntegra da implantação de sistemas solares, deve ser elaborada.

Mesmo as perspectivas sobre a substituição dos combustíveis fósseis pela geração renovável ser positiva, não podemos ter a convicção de que estas fontes são a resposta definitiva para a preocupação com os impactos ambientais.

No caso dos painéis solares, que têm uma longa vida útil, a reciclagem não foi uma preocupação nos primeiros 25 anos de expansão desta tecnologia. Entretanto, um número considerável do primeiro lote de painéis solares instalados está sendo retirado e uma boa gestão destes resíduos se tornou uma questão ambiental importante (Aman et al., 2015).

Assim, com grande potencial de instalação de sistemas de geração de energia fotovoltaica, é relevante dimensionar os impactos do descarte de painéis solares para o planejamento dos resíduos energéticos do estado do Ceará.

2.1 Por que renovar as fontes energéticas?

Segundo o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), as promessas dos países ficaram aquém do que é necessário para a redução das emissões dos gases do efeito estufa e redução da temperatura. O mundo está caminhando para produzir mais carvão, petróleo e gás natural do que seria consistente para limitação do aquecimento a 1,5°C ou 2°C, dificultando o alcance das metas climáticas (PNUMA, 2019).

O nível atual de emissões globais de gases do efeito estufa é agora quase exatamente ao nível das emissões projetadas para 2020. Desta forma, não houve mudança real nas emissões globais na última década. Os efeitos das políticas climáticas foram pequenos demais para compensar o impacto das emissões (Christensen; Olhoff, 2019).

Considerando que mais da metade da população mundial (55%) vive em cidades, o que corresponde a dois terços da demanda global de energia e cerca de 75% das emissões globais de CO₂, reside assim, nas cidades, um espaço oportuno para a transição energética, devido a sua alta demanda, verificada pelo uso intensivo nos transportes, aquecimento e refrigeração (Renewables in Cities, PNUMA, 2019).

Para atender as demandas das cidades, diante da alta concentração populacional e do modelo de urbanização, tem-se destaque as hidroelétricas na matriz energética brasileira, considerada uma fonte renovável. Entretanto, na região Nordeste do Brasil, marcada por escassez hídrica e regime severo de chuvas concentradas no primeiro semestre do ano, diversificar a matriz energética em direção a energia fotovoltaica é uma forma de promoção de uma economia socialmente ajustada e menos vulnerável aos efeitos do clima, reduzindo assim uma assimetria regional secular de inclusão social e econômica. Além do mais, no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Sobre as plantas urbanas da cidade de Fortaleza/CE, no que se refere ao Plano Fortaleza 2040, que é um instrumento que apresenta um conjunto de estratégias, diretrizes e planos de ações voltadas para o planejamento da cidade, tem um capítulo dedicado à energias renováveis e eficiência energética, norteado pela busca da segurança energética e pela preocupação com a preservação do meio ambiente. Duas linhas estratégicas de planejamento energético ganham destaque: o desenvolvimento de energias alternativas e as ações de conservação de energia. Coerente com estas estratégias têm-se as seguintes metas definidas neste instrumento: Os ganhos com medidas de eficiência energética sejam equivalentes de 20% da demanda de energia daquele ano; e que Fortaleza seja uma geradora líquida de energia elétrica (montante de energia gerada seja maior que a consumida). Inclusive, destaca-se o seguinte detalhamento orçamentário, que contribui para a projeção da expansão da geração fotovoltaica: Ampliar a rede de empreendimentos privados de micro e minigeração distribuída, R\$ 14.932.303.860,52; Ampliar a rede de empreendimentos públicos de micro e minigeração distribuídas, R\$ 895.938.231,63; criação, implantação e fortalecimento de centro de referência em desenvolvimento de soluções tecnológicas energéticas e tropicalização de soluções tecnológicas internacionais, R\$ 20.000.000,00.

Sobre o planejamento estratégico estadual, o Ceará 2050, em junho de 2020, acessando através da internet o site oficial <http://www.ceara2050.ce.gov.br>, nada se apresenta de concreto sobre as metas energéticas. Há uma promessa para breve. Nas palavras do Professor da Universidade Federal do Ceará (UFC) e Coordenador da Plataforma Ceará 2050, Antônio Miranda, no boletim informativo nº 8, de 17 de maio de 2019:

“Em breve, caminhos serão apresentados e discutidos com a sociedade, mostrando que chegar a um Ceará de sonhos realizados é possível”.

Desta forma, assistimos um esvaziamento de prognósticos quando se refere ao Ceará diante da sua constituição de planejamento, quando o documento não ofereceu nenhum esclarecimento sobre a temática presente.

2.2 O descarte dos resíduos fotovoltaicos

Quanto tempo levaremos para perceber que os resíduos oriundos das energias renováveis são um problema? E, convencidos do problema, quanto tempo mais para se tomar providências?

A geração fotovoltaica pode ser centralizada, como nas usinas, ou descentralizadas, pequena geração residencial, por exemplo. Portanto, é importante lembrar estas distinções diante das implicações para a gestão de resíduos. Por exemplo, para os pequenos sistemas fotovoltaicos, dispersos, podem ter custos adicionais significativos para desmontagem, coleta e transporte dos painéis fotovoltaicos em fim de vida. Em contraste, a gestão de resíduos das usinas fotovoltaicas de grande escala é logisticamente mais fácil (IRENA, 2016).

Os custos de logística podem se tornar decisivos na devolução dos sistemas para painéis fotovoltaicos em áreas remotas (United Nations Conference on Trade and Development, 2014). A formação de monopólio nos serviços de logística para reciclagem pode gerar uma adição nos custos, como também, em um cenário competitivo, reduzir os preços.

Tecnologias de reciclagem para painéis fotovoltaicos têm sido pesquisadas, fornecendo uma base para o desenvolvimento especializado de plantas dedicadas à reciclagem, desde de que ocorram fluxos de resíduos suficientes para uma operação lucrativa (Sander et al., 2007). Nisto, institutos de pesquisa também examinaram diferentes opções de reciclagem para painéis fotovoltaicos (CU PV, 2016).

Assim, para certificar a sustentabilidade dos painéis fotovoltaicos em grandes escalas de implantação, é crucial estabelecer tecnologias de reciclagem de baixo custo para a indústria fotovoltaica em evolução, e, paralelamente, estabelecer uma rápida comercialização dessas novas tecnologias (Chowdhury et. al., 2020).

3) Objetivos

A partir da compreensão do ciclo de vida e da análise do potencial e da capacidade instalada de plantas dedicadas à geração de energia renovável fotovoltaica no Ceará, o objetivo é contribuir com o planejamento e a gestão da infraestrutura energética no Ceará no que se refere ao descarte das placas fotovoltaicas.

3.1 Objetivos específicos

Esclarecer a necessidade das fontes renováveis de geração de energia;

Quantificar o potencial de resíduos referente às placas fotovoltaicas;

Contribuir para o planejamento estadual da gestão de resíduos solares.

4) Fundamentos Teóricos

4.1 Humanidade e energia

Ao longo da história, diante do desenvolvimento científico, a energia foi ganhando diferentes definições, conceitos. À medida que a ciência se ramificava, a energia ganhava novas leituras. Física, química, biologia buscaram em seus arcabouços teóricos uma definição para energia. Ou seja, desde a tração animal até as partículas nucleares, a energia esteve presente e foi sendo desvendada. Assim, a energia, o desenvolvimento de suas formas de conversão e utilização, acompanharam o desenvolvimento e compreensão que experimentou a espécie humana do mundo que a cerca.

A narrativa dessa relação, humanidade e energia, revela a própria relação do homem com a natureza e com o desenvolvimento da ciência. Mais ainda, revela mais do que a funcionalidade física da energia, mas como o acesso à energia pode ser um instrumento para igualdade ou desigualdade social. O acesso à energia elétrica é mais amplo em sociedades que promoveram justiça social, ao mesmo tempo que permanece um privilégio em sociedades segregadas. O acesso à energia revela a importância da compreensão da política voltada para o setor energético. No arcabouço político reside a capacidade de determinar o acesso à energia e a justiça social. O conceito de nexos, que será apresentado no texto, como as discussões das legislações de alguns países, demonstram a relevância da compreensão da dimensão política.

Continuando, a compreensão da relação entre a História da energia e o desenvolvimento das sociedades contribui para projeção do futuro, ou seja, contribui para pensarmos que destino podemos ter, enquanto espécie, que consome a natureza. Neste contexto, entender trajetória histórica mostra, se como humanidade, somos capazes de conviver com o meio natural ou se somos predadores vorazes e incansáveis.

Mas, onde começa a relação da humanidade com o consumo de energia?

O desenvolvimento cerebral, e de suas ligações sinápticas, foi o primeiro grande consumidor energético e exigiu a busca por fontes de energia mais eficientes. As células cerebrais, juntamente com as células de todos os tecidos, devem ter um suprimento de moléculas de ATP (adenosina trifosfato), moeda energética dos organismos, para realizar suas funções (Barrickman, 2017). O cérebro humano adulto consome aproximadamente 20 a 25% da energia produzida pelo metabolismo, mesmo possuindo apenas cerca de 3% da massa corporal (Kuzawa et al., 2014).

Com uma ferramenta de grande exigência energética, que é o cérebro, o domínio do fogo vai ter um papel primordial na obtenção de maior eficiência no consumo de energia. Com o domínio do fogo os grupos humanos puderam contar com luz, calor e um meio letal de defesa. No entanto, o ganho mais significativo diante da perspectiva que se coloca aqui foi a possibilidade de cozinhar.

Cozinhar possibilitou um maior ganho de energia calórica, e com este ganho, ocorreu expansão do cérebro. Assim, nos tornamos a espécie que possui o maior número de neurônios no córtex cerebral, que é a parte do cérebro responsável por

descobrir padrões, raciocinar de modo lógico, prever o pior e preparar-se para lidar com ele, criar tecnologia e transmiti-la por meio da cultura. Desta forma, esta pré-digestão, antes de o alimento chegar à boca, conhecida como cozinhar, libertou o homem das restrições energéticas impostas pela dieta crua, disponibilizando maior aporte calórico dos alimentos. Passou-se a ter uma maior disponibilidade energética com os alimentos digeridos, como também a ingerir e digerir mais rápido. Com este avanço alimentar, igualmente avançamos no número de neurônios, o que foi essencial para o desenvolvimento humano (Herculano-Houzel, 2019).

Comparando a cronologia das espécies, a humanidade rapidamente ascendeu na cadeia alimentar. Essa ascensão deve-se, além das conexões neurais que continuamos a desenvolver, do ponto de vista energético, mais uma vez ao domínio do fogo e o ganho que este domínio proporcionou. Portanto, o fogo anunciava o que estava por vir. Avançamos vorazmente sobre outras espécies animais, como apontam as evidências arqueológicas sobre a autoria da espécie humana nas extinções de outras espécies (Grayson, Donald K.; Meltzer, David J, 2015).

Já com a agricultura, começou-se a produzir e estocar energia oriunda do sol, convertida através da fotossíntese, e com isto, o modo de vida se modificava. A estrutura social se configurou para funcionar coerente com esta nova organização, sedentária, que planejava suas ações, mesmo sem ter a exata dimensão destas ações e suas consequências no meio natural. Não imaginavam, os primeiros agricultores, que formavam a base das civilizações, do crescimento populacional exponencial e que a proliferação da espécie humana seria capaz de interferir no clima do planeta.

Desta forma, a primeira fonte de energia, ou melhor, a primeira forma de conversão de energia era através dos alimentos. Convertia-se combustíveis orgânicos, energia solar fóton sintetizada, em movimento muscular. Contudo, a necessidade de obtenção de energia cresceu. Novas formas de conversão de energia, além da fotossíntese, deram pluralidade na matriz energética e impulsionaram o desenvolvimento humano.

Concomitante a agricultura, domesticou-se animais, ao invés de arriscadamente caça-los. Enquanto criadores, modificou-se a genética das espécies. Assim, com a dominação de outros animais conquistou-se fonte proteica, tração, transporte, ajuda na segurança, na guerra, na indústria farmacológica, no entretenimento, na prática esportiva e até afeto com os animais de estimação. Estabeleceu-se práticas brutais como uma forma de sermos servidos (Blount, W. P, 1968; Ramaswamy, 1998; Doerfler, R. L., Peters, K. J, 2006; Mkono, M.; Holder. A., 2019).

Logo, com o crescimento populacional e o desenvolvimento das estruturas sociais, outras fontes de energia foram acessadas. O vento passou a preencher a vela dos navios e distâncias maiores passaram a ser percorridas. Com a energia contida no deslocamento das águas, dos ventos também, moveu-se moinhos, dando maior eficiência no processamento de alimentos. Eram necessidades energéticas que não exigiam grande eficiência e onde não importava se acontecesse paradas momentâneas.

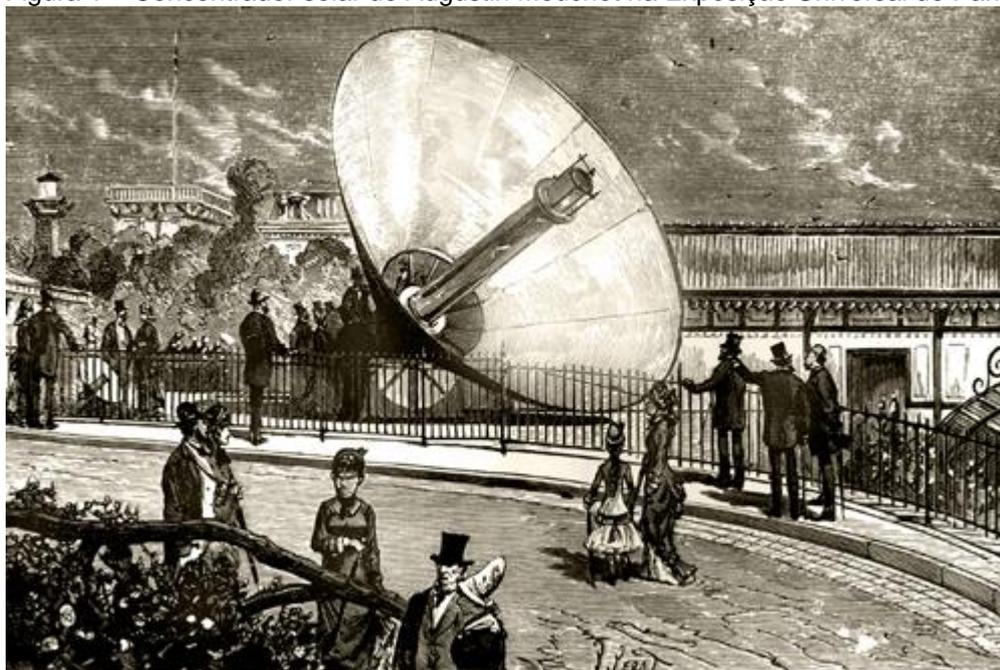
Contudo, foi para um trabalho mais eficiente que os motores a vapor se tornaram mais populares. Seu princípio de funcionamento era conhecido desde a antiguidade grega, no entanto, foi a necessidade de retirar água dos estratos mais profundos das minas de carvão que tornou o motor a vapor mais conhecido. O carvão mineral foi nossa primeira incursão aos combustíveis fósseis. A população havia crescido,

florestas já não forneciam lenha em quantidade satisfatória, nem os extratos mais superficiais da mineração de carvão eram suficientes. Foi preciso explorar as minas inundadas antes inacessíveis. A propulsão dos motores a vapor não se restringiu à sucção das minas, já em 1900, enormes navios não dependiam mais dos ventos, sofisticados motores a vapor impulsionavam e geravam energia (Brooke; Lubar, 1986; Rutland, 1987; Ashwani, 2004).

Assim, os motores a vapor aceleraram a Revolução Industrial na Inglaterra. Do bombeamento das minas, sua origem neste contexto, passaram a movimentar teares e descaroçadores de algodão. Percebe-se romper o limite inicial da funcionalidade, bombear, para outras funções, como tear e descaroçar. Como é sabido, o transporte igualmente progrediu. Desta forma, em 1825, vagões cheios de carvão foram transportados por 20km através de trilhos, impulsionados por um motor a vapor. Esse foi o início da história ferroviária. Depois deste dia, com o passar do tempo, a Europa teve seu território emaranhado por milhares de quilômetros de linhas férreas, sendo que, 70% das linhas atuais em serviço foram estabelecidas em 1900 (Marks, 2007; Martí-Henneberg, 2013).

Na busca por fontes de energia, além do carvão e da madeira, Augustin Mouchot, construiu em 1866, o primeiro motor a vapor movido por energia solar em grande escala, como mostra a figura 1 a seguir:

Figura 1 – Concentrador solar de Augustin Mouchot na Exposição Universal de Paris, 1878.



Fonte: <https://alternativeenergy.procon.org/historical-timeline>. Acesso em outubro de 2020.

A máquina de Mouchot continha um espelho côncavo que direcionava a radiação solar para uma caldeira cilíndrica de vidro. No interior da caldeira, a água em ebulição alimentava uma pequena máquina a vapor. Já em 1882, Abel Pifre, apresentou em Paris um motor solar composto por espelho côncavo e caldeira, o qual ligado a uma prensa gráfica imprimiu 500 cópias do jornal *Journal Soleil*. (Butti, K.; Perlin, J. 1980; Kryza, F. 2003).

Assim, em um mundo cada vez mais veloz, não demorou para que, a energia que os físicos descobriram estar contida no interior dos átomos, pudesse contribuir com o florescimento de usinas nucleares.

No entanto, a mais instigante e marcante mudança veio com o motor de combustão interna. Neste novo cenário, movido pelo combustível fóssil, o petróleo passou a definir muito da geopolítica mundial, passou a ditar o ritmo da economia mundial. Mais de 200 milhões de anos, pela lenta decomposição de florestas gigantescas que cobriram a terra, período conhecido geologicamente como carbonífero, houve um processo que formou o carvão mineral, mesmo processo que derivou o petróleo e o gás natural (Reeves, H.; Lenoir, F., 2006). Com a expansão da exploração dos elementos fósseis, os impactos ambientais da atividade humana sobre os recursos naturais foram potencializados.

Todavia, sobre as energias renováveis, o desenvolvimento das células solares ocorreu devido aos experimentos do físico francês Edmund Becquerel, 1839, que observou condutividade de certos materiais sensíveis à luz. Quase vinte anos depois Willoughby Smith descobriu a fotocondutividade do selênio e, em 1876, William Grylls Adams e Evans Day mostraram que este material produzia eletricidade quando exposto à luz (Kryza, F. 2003).

Não se pode esquecer que, apesar das diversas experiências ocorridas, imensa contribuição para o entendimento do princípio de funcionamento da emissão de elétrons em materiais expostos à luz veio com uma publicação de Albert Einstein (1905), quando expôs a ideia de que a luz era formada por pacotes de energia, conhecidos como fótons, e que sua quantidade de energia variava com o comprimento de onda, ou seja, quanto menor o comprimento de onda da luz, maior a energia. Esta formulação contribuiu para um melhor entendimento acerca do efeito fotoelétrico (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2020).

No entanto, com a preponderância do petróleo como fonte combustível para o transporte, outras fontes ficaram obscurecidas. Todavia, em 1954, nos Laboratórios Telefônicos Bell (Nova Jersey, EUA), eram construídas as primeiras células fotovoltaicas de silício, que apresentavam uma eficiência próxima a 6%, cinquenta vezes maior que a sua precursora, as células fotovoltaicas de selênio, que além de baixa eficiência tinha rápida degradação. Contudo, provavelmente por possuir alto custo, a aplicação comercial das células fotovoltaicas de silício destinou-se à indústria aeroespacial, para alimentar o sistema de comunicação do satélite artificial Vanguard I, em 1958 (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2020).

Agora, sobre a conversão para energia elétrica, esta ocupa um lugar tão amplo nas vidas contemporâneas que parece sempre existiu, no entanto, ela possui apenas cerca de 200 anos que vem se popularizando ao redor do mundo, e, sob novas formas de obtenção, mais renováveis, a História é ainda mais recente.

No mundo contemporâneo, as grandes safras florescem independentes da tração animal. Nelas, insumos químicos multiplicaram a fertilidade. Aliás, fertilidade que a produção industrial multiplicou não apenas no meio vegetal, mas animal também. Nesta proliferação do sucesso humano, acrescenta-se: o encurtamento das distâncias, através da eficiência energética, de transportes mais velozes e com capacidade de carga ampliada. Enfim, no mundo contemporâneo, a energia alimenta a indústria, que por sua vez substituiu o ritmo de vida fotossintético por um ritmo da produção eletro mecanizado. Tudo isto, esta aceleração dos processos produtivos e

consumo de volumes maiores de recursos naturais tem um custo, que pode ser avaliado ambientalmente.

Especialistas estimaram que a taxa de desaparecimento anual de espécies é mil (1000) vezes mais veloz atualmente que no período pré-industrial, e que mais de 30% das espécies poderão desaparecer até 2050 (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006).

Como já se disse, a expansão vertiginosa da espécie humana foi capaz de trazer mudanças para o clima planetário. A preocupação com as consequências das alterações climáticas impulsionou a busca por alternativas que desaceleram essas alterações e suas consequências. Colocar em prática as ações necessárias para redução das mudanças climáticas catastróficas tem se mostrado um desafio hercúleo.

4.2A questão climática e a migração para energias renováveis

O risco de impactos relacionados ao clima é resultado de interações complexas que se relacionam a um quadro de adaptação dos sistemas antropogênicos e os sistemas naturais.

A temperatura média global anual na superfície do planeta já aumentou a uma taxa de 0,07°C por década, desde 1880, no entanto, a partir de 1970 essa taxa passou a ser de 0,17°C. O mês de março de 2020 marcou 423º mês consecutivo com temperaturas, nominalmente, acima da média do século XX (Noaa, 2020).

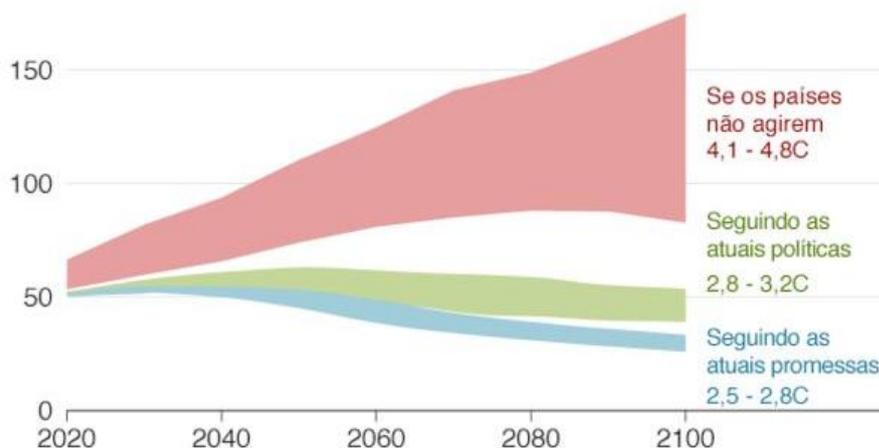
Com o aumento da temperatura podemos observar outros impactos decorrentes, como: aquecimento dos oceanos, encolhimento da cobertura de gelo do Ártico, aumento global do nível do mar e alteração na bioquímica do ciclo do carbono. Além disso, também se observou um aumento na frequência de incêndios florestais, que liberam gases do efeito estufa (Taylor et al. 2013).

Se a concentração de CO₂ atmosférico aumenta de 406 ppm, seu nível atual, para 450-600 ppm, isto levaria a um aquecimento superior a 2°C no próximo século. Este aumento de 2°C levaria a diversos impactos irreversíveis, incluindo aumento do nível do mar (Smith et al. 2011 Apud Global Environment Outlook, 2019).

Numerosos climatologistas afirmam: já estamos no ponto que, mesmo uma limitação abrupta das emissões de CO₂, seria necessário mais de um século para cessar o aquecimento (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006).

Portanto, o clima que teremos no futuro dependerá da continuidade das emissões antropogênicas e da variabilidade climática natural. O gráfico 1, a seguir, demonstra a projeção sobre três perspectivas: se nada for feito, se continuar o cenário atual e se as medidas necessárias forem efetivas.

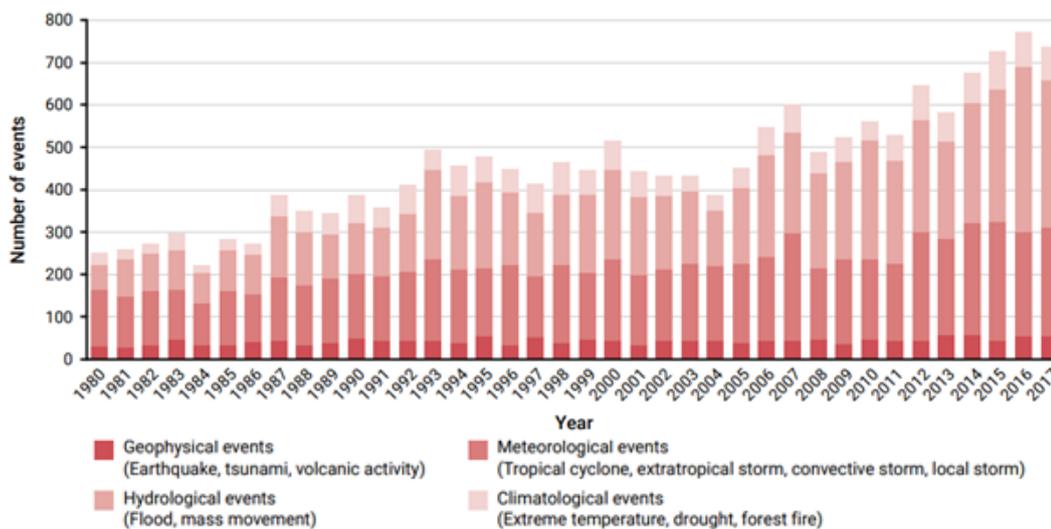
Gráfico 1 – Emissões e aquecimento esperado até 2100*



Fonte: Climate Action Tracker/*emissões em Gigan toneladas de CO₂

Com aumento médio da temperatura superior a 1,5°C os impactos teriam implicações na qualidade e quantidade de serviços ecossistêmicos. Desta forma, entre os impactos vigoram eventos extremos como: inundações, furacões e ciclones. Estes eventos extremos são responsáveis por perda de vidas, secas severas, insegurança alimentar, ondas de calor, desaceleração do crescimento econômico e aumento potencial para conflitos violentos. Esses eventos extremos já estão estimados na perda de 400.000 vidas e custo de US \$ 1,2 trilhão anualmente na economia global (*Global Environment Outlook – GEO-6*, 2019). A escala de possíveis danos causados pelas mudanças climáticas representa um grande risco sistêmico para o nosso futuro (OCDE, 2017). O gráfico 2, a seguir, expõe os tipos de natureza dos impactos é a duplicação da frequência destes eventos relacionados ao clima desde 1980 (Hoeppe, 2016)

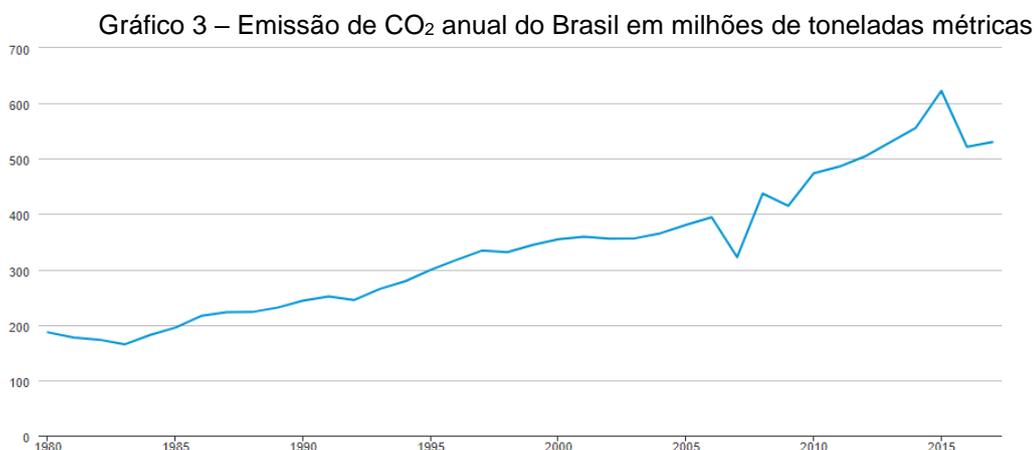
Gráfico 2 – Quantidade de eventos climáticos extremos



Fonte: OCDE, 2017.

Até 2015, o consumo global de energia atingiu cerca de 13,5 bilhões de toneladas de petróleo, devendo aumentar para cerca de 19 bilhões toneladas até 2040 (IEA 2016). Grande parte desse aumento é atribuída ao consumo das economias em desenvolvimento, que atualmente dependem de fontes de energia de origem fóssil. Este quadro de expansão no consumo torna a eficiência energética crucial para

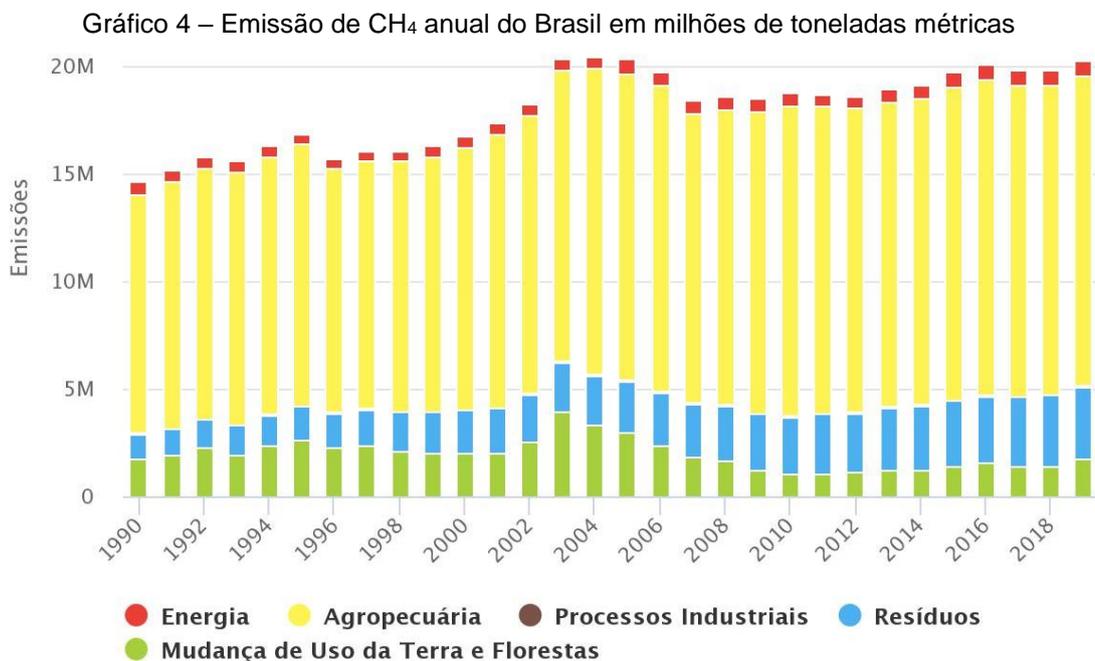
mitigar impactos relacionados à produção de energia. Neste contexto, como esperado de uma economia emergente, o Brasil tem aumentado sua emissão de carbono, como mostra o gráfico 3 a seguir.



Fonte: EIA, acesso:

https://www.eia.gov/opendata/embed.php?type=chart&series_id=INTL.4008-8-BRA-MMTCD.A, dia 18 de junho de 2020.

Importante lembra que, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (ONU), o metano (CH₄) é muito mais potente que o gás carbônico (CO₂): em um período de 20 anos, uma tonelada de CH₄ causa um aquecimento correspondente a 85 toneladas de CO₂. Desta forma, apesar de menor emissão em números absolutos, compara ao gás carbono, as emissões de metano apresentam potencial devastador semelhante (SEEG, 2020). Neste contexto, o Brasil tem aumentado sua emissão de metano, como mostra o gráfico 4 a seguir.



Fonte: SEEG, acesso: http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#, dia 06 de julho de 2021.

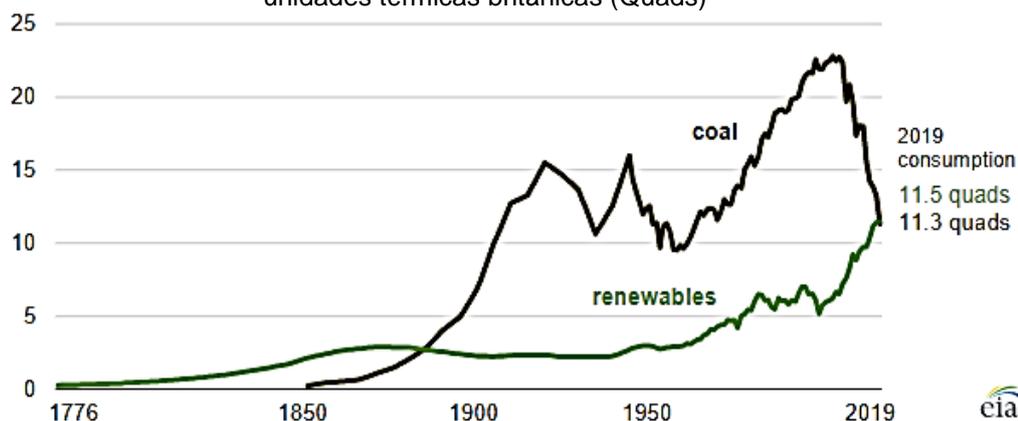
4.3 As fontes de energia renováveis

A transição para fontes de energia renováveis, de baixo carbono, tem sido grandemente auxiliada por uma redução nos custos. Em especial, os sistemas solares fotovoltaicos sofreram uma queda de preço de 23% para cada duplicação da produção nos últimos 35 anos. Em muitos casos, esses custos agora são mais baixos do que os custos da geração de eletricidade através de tecnologias que utilizam combustíveis fósseis (IRENA, 2015).

De toda energia solar que chega à Terra, por exemplo, aproximadamente metade atinge a superfície, totalizando cerca de 885 milhões de TWh/ano, mais de 8.500 vezes o consumo final total de energia mundial (IEA, 2011). Da liberação de energia oriunda do sol derivam várias fontes energéticas primárias existentes na Terra, como a hidráulica, eólica, biomassa e os combustíveis fósseis (EPE, 2018).

A geração de energia renovável tem crescido. Por exemplo, o consumo de energia renovável nos EUA, superou o de carvão pela primeira vez em mais de 130 anos (1776-2019), como demonstra o gráfico 5 a seguir:

Gráfico 5 – Consumo de carvão e energias renováveis nos EUA (1776-2019) Quatrilhão de unidades térmicas britânicas (Quads)



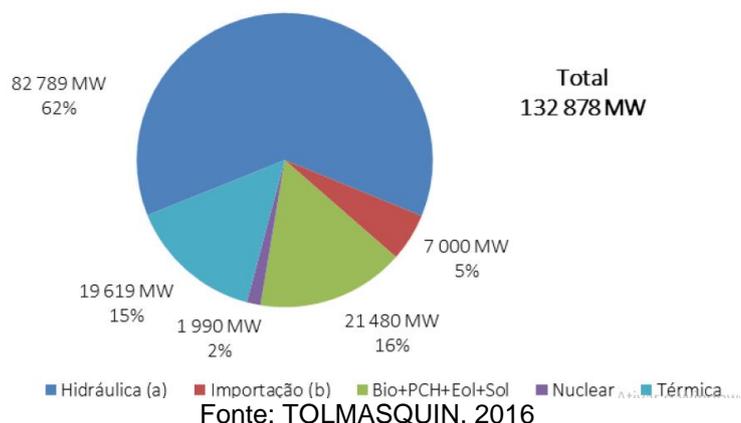
Fonte: US Energy Information Administration, 2019.

Assim, as energias renováveis, originadas de recursos considerados inesgotáveis, são de diversos tipos. A energia do sol pode ser aproveitada de diversas formas, seja pela ação dos ventos, pelo movimento das marés, através da fotossíntese realizada pelos vegetais, ou mesmo pela conversão da biomassa em outras formas de energia. Com o aquecimento global e a ameaça da finitude dos recursos de origem fóssil, a geração de energia renovável tem se expandido.

Nas últimas previsões de 5 anos da Agência Internacional de Energia (AIE), a capacidade de energia renovável mundial deve aumentar em 50% entre 2019 e 2024, liderada pela energia solar fotovoltaica. Esse aumento de 1200 GW é equivalente à capacidade total instalada de energia dos Estados Unidos atualmente. A energia solar fotovoltaica sozinha é responsável por quase 60% do crescimento esperado, com a energia eólica *on-shore* representando um quarto deste crescimento esperado.

No Brasil, as fontes renováveis se destacam pelo uso das hidroelétricas, como se observa na figura 2 a seguir.

Gráfico 6 - Matriz energética do sistema interligado brasileiro em 2014



Contudo, é notável o potencial brasileiro para instalação de diversas fontes renováveis, além da hidráulica, seja pela força dos ventos, seja pela radiação solar, seja pelo aproveitamento da biomassa.

Neste contexto, de elevada radiação, usinas de grande porte fotovoltaicas têm sido instaladas principalmente nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e também no Sudeste do Brasil, trata-se da geração centralizada. No entanto, em termos de cenários futuros, quando as usinas instaladas tenderem à saturação, pode-se esperar que usinas de grande porte também venham a ser instaladas em outras regiões potenciais, disseminando a geração fotovoltaica centralizada por todo o país (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Outro fator que contribui para disseminação da energia fotovoltaica é a geração distribuída, que é a geração elétrica produzida nas proximidades do consumidor, notadamente urbana e integrada em telhados e coberturas de edificações. No Brasil, os valores máximos de demanda por energia elétrica têm crescido no verão, especialmente entre 12 e 15 horas, horário de grande disponibilidade de radiação solar para a geração fotovoltaica (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017). Assim, teoricamente, considerando o consumo residencial em 2013, que foi de 124.896,0GWh, a geração distribuída fotovoltaica seria capaz de suprir totalmente a carga residencial e ainda produzir um excedente de 130,0% para a rede elétrica, se fosse totalmente utilizada. O potencial é imenso, em 2016, o Brasil produzia 9,0 MW de energia solar fotovoltaica. Já no primeiro semestre de 2018, o Brasil alcançou 250,0 MW de potência instalada em sistemas solares fotovoltaicos de microgeração distribuição (EPE, 2014).

A geração de energia solar fotovoltaica distribuída mostra grande potencial de mercado, o que poderia reduzir significativamente a necessidade de grandes investimentos em energia centralizada dentro do Sistema Interligado Nacional (NIS), se tivesse seu potencial desenvolvido, ou seja, quando associamos disponibilidade e demanda é fácil projetar um cenário de crescimento. Crescimento que favorece a redução nos custos de instalação, que por sua vez novamente favorece a expansão da energia solar fotovoltaica no cenário nacional. Contudo, novamente, quais serão os impactos desta expansão, especialmente quando falamos dos resíduos?

4.4 O que é a política para as energias renováveis

Assistiu-se, da pré-história as primeiras civilizações, o cérebro humano se expandir e adaptar-se a crescentes quantidades e tipos diferentes de informações, especialmente numéricas, quando, por exemplo, controlou-se quantidade de alimento produzidas nas safras para alimentar adequadamente o conjunto de pessoas. Agora, milhões de dados são incessantemente associados e processados para administrar o Estado: impostos, posses, dívidas, atrasos, multas, descontos e isenções. O tamanho do Estado é proporcional a sua capacidade de organizar e processar dados, controlando a vida e a produção.

Desta forma, o Estado é a estrutura que organiza a produção e disponibiliza o consumo de energia, seja a energia da conversão da luz através da fotossíntese no processo agrícola, seja a produção de energia elétrica que exige grandes investimentos estatais.

Aproximadamente, desde 1500 até o início do século XXI, a população humana aumentou 14 vezes, a produção 240 vezes, e o consumo de energia aumentou 115 vezes (Christian, 2004. Apud Harari, 2018).

IRENA (2017), aponta que mais de 170 países estabeleceram metas de energia renovável e cerca de 150 promulgaram políticas para catalisar investimentos em tecnologias de energia renovável.

Com isto, deve-se ressaltar que, respondendo as alterações climáticas globais, nenhum Estado isoladamente pode ser eficaz. Os comportamentos sobre essas questões devem seguir um padrão igualmente global, que são definidos a partir das políticas climáticas de cada nação.

Portanto, supondo desconsiderar as fronteiras geopolíticas em favor das questões ambientais, as sociedades encontram-se em situação idêntica quanto ao aquecimento global. Desta forma, as energias renováveis vigoram como uma resposta da necessidade climáticas globais e ocupam expansionismo igualmente globais com recortes das desigualdades econômicas mundiais, assim, nações mais desenvolvidas econômico e tecnologicamente têm apresentado maior desenvolvimento de produção de energia renovável.

Como responde o Brasil diante dessa questão ambiental global?

Tratando-se do Brasil, durante o governo do presidente Jair Bolsonaro (2019-2022) teve-se um retrocesso na proteção ambiental. Após uma forte redução nas taxas de desmatamento de 2004 (18.900 km²) a 2012 (4.656 km²), o desmatamento cresceu novamente para 7.900 km² em 2018 (PNUMA, 2019). E mais, o Presidente Jair Bolsonaro, eleito em 2018, reduziu o orçamento do Ministério do Meio Ambiente para atividades relacionadas à mudança climática; relaxou as regras de proteção ambiental para converter multas em compensações alternativas; estendeu os prazos para adequação e aboliu a maioria dos comitês e comissões de participação civil e controle social no governo federal (*Climate Action Tracker* 2019b). Neste contexto, não se pode esquecer a relevância das florestas brasileiras e os serviços ambientais globais prestados como, biodiversidade e o sequestro de carbono.

Apesar das más notícias em relação as emissões atmosféricas, nos leilões mais recentes, o vento tem sido a tecnologia mais competitiva com concessões de 4GW,

seguida de solar (3,3GW), hidrelétrica (1,6GW) e biomassa (1,0 GW) (Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL], 2019).

No mais, baseando-se nas ideias do economista Angus Deaton (2017), prêmio Nobel, sobre as estruturas de poder, imagine-se um cenário no qual as energias renováveis despontem como uma nova ordem mundial. Neste cenário, as antigas estruturas de poder, e os grupos econômicos correspondentes, “conservadores” fornecedores de energia, devem agir politicamente para interferir na ascensão dessa nova ordem mundial regida pelas energias renováveis.

Ou seja, para a extração eólica basta a conversão dos ventos em energia elétrica; para a conversão fotovoltaica, basta a captação da luz solar; para a biomassa, basta a coleta dos resíduos vegetais. No entanto, para a conversão de energia a partir dos combustíveis fósseis, a extração que antecede o refino já constitui uma extensa e poderosa indústria, que afeta a economia global com o seu desempenho. Portanto, não há absurdo supor que essa indústria de matéria prima fóssil resistiria a uma transição da matriz energética para fontes renováveis enquanto ela ainda possuir reserva. Desta forma, esta resistência conservadora teria implicações políticas tanto quanto econômicas.

Como é sabido, as fontes renováveis, pelo menos em sua maioria, não são uma novidade. Por exemplo, a energia maré motriz e eólica são medievais (Huberman, 2010). Já a conversão da biomassa em energia acompanha a própria história do desenvolvimento das sociedades humanas. Daí, percebe-se, novamente a força da indústria fóssil, que não encontrou o debate de uma consciência ambientalmente responsável sobre seus impactos globais por quase um século. Assim, aliando poder econômico, disputa territorial e despreocupação ecológica, compreendemos a extensão das fontes de energia de origem fóssil no cenário geopolítico.

Na questão política sobre as energias renováveis está incorporada o exercício da cidadania da seguinte forma, enquanto o cidadão não exigir politicamente a ampliação da matriz energética em direção às fontes renováveis, a vontade política mostra-se lenta. No caso do Brasil atual, por exemplo, em relação à defesa ambiental, assiste-se a um retrocesso. Sem a participação popular consciente, “a questão vai se arrastar até o esgotamento das energias fósseis” (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006).

Por fim, um outro aspecto de habitat político diz respeito à destinação dos resíduos. Nesta compreensão, povoando o campo político e tornando-se lei, por exemplo, a liberação da fabricação e venda dos módulos fotovoltaicos atrelada impreterivelmente a elaboração de um plano de resíduos e coordenado pelos fabricantes apontaria para uma solução do descarte já institucionalizada politicamente.

Contudo, sobre a necessidade do debate político e a realidade do desenvolvimento das discussões, um estudo conduzido na Austrália, através de entrevistas ligadas ao setor de geração solar fotovoltaica, concluiu sobre a desconexão política no setor e a necessidade clara de formulação de políticas regulatória. O impacto deste vácuo político é evidente quando se refere as práticas de descarte, quando são ausentes regulamentos claros sobre a coleta, transporte, métodos de armazenamento e descarte para painel fotovoltaico solar (Mathur, D. et. al., 2020). No entanto, existem exemplos de legislações mais avançadas sobre o tema, como veremos mais adiante com a União Europeia (EU).

4.5 A economia diante das energias renováveis

Nota-se que, a geração e distribuição de energia elétrica constitui-se um trabalho tão especializado que não conseguiríamos avaliá-lo sem um sofisticado sistema monetário, ou seja, o dinheiro é meio de avaliação intrínseco para valorar a energia e sua distribuição. No fim da Idade Moderna éramos uma única zona monetária, baseados no metalismo, depois na libra esterlina e no dólar americano (Harari, 2018). Com isto, dentro deste mercado global, que a ordem monetária inaugurou, as tecnologias se disseminam mais facilmente como um produto fruto deste mercado.

Portanto, a relação economia/mercado e energias renováveis, como marco do desenvolvimento tecnológico, é evidente. O dinheiro investe no desenvolvimento tecnológico. Assim, independente das questões ambientais, o crescimento econômico se confunde com o avanço tecnológico. Para o binômio economia/tecnologia, impõe-se fortemente o investimento em pesquisa científica, que se tornou fundamental para a economia moderna, na busca incessante pelo lucro. Nesta lógica, a ciência foi impulsionada pelo capitalismo. E qual o problema disto? O problema é a ausência de ética no capitalismo. Se pensarmos que o acesso à energia pode se traduzir na sobrevivência, como por exemplo: no aquecimento diante do frio mortal, nos aparelhos médicos que tratam e mantêm a vida de pacientes, na possibilidade de trabalho, de uma produção doméstica, no cultivo e preparo de alimentos, no acesso a água, através de recalque e bombeamento. Para essas atividades, que em algum momento se mostram imprescindíveis para a sobrevivência, rendida a lógica capitalista, resta a seguinte condição: sem dinheiro, sem direito a sobreviver, tratar-se, trabalhar, produzir, irrigar, alimentar-se. Assim, diante desses aspectos que circundam a vida moderna, intensamente eletrificada, para o direito à vida, o acesso à energia não deveria ser regido exclusivamente por leis de mercado, que visam com rigidez o lucro acima da existência humana.

Diante disto, quando refere-se ao consumo, um dos pilares da economia, tem-se os seguintes dados globais, 20% da população mundial consome (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006):

- 80% de energia não renovável;
- 85% de produtos químicos sintéticos,
- 40% da água doce;
- E emite 10 vezes mais gases do efeito estufa que o restante.

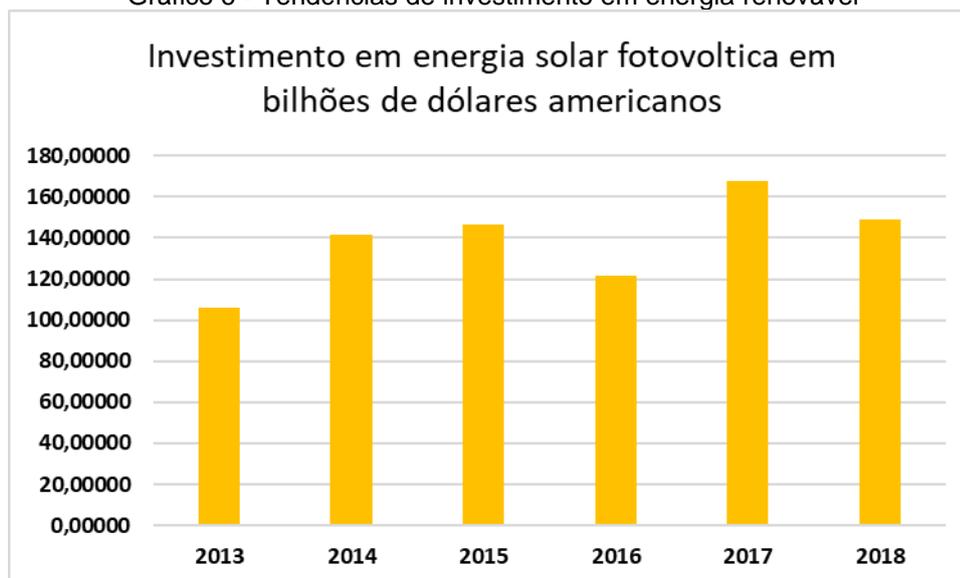
Será que o objetivo da geração de energia renovável é constituir-se apenas mais um instrumento para o lucro? Ou poderá ser um modelo mais democrático de promoção de igualdade social?

O fato é, sem energia e matéria prima, o sistema produtivo entra em colapso. Encontrar fontes renováveis é requisito para a própria sobrevivência do sistema capitalista. Lembremos que as ameaças de parar a produção, ou mesmo desacelerar a crescimento econômico, são respondidas com investimentos em pesquisa para encontrar formas mais eficientes de explorar os recursos. É este o berço das energias renováveis, a insustentável necessidade capitalista de manter incessante a exploração crescendo.

Com isto, desprovida de ética, com estreita visão no lucro, assistimos crescer a economia de 2015 comparado aos anos de 1500. No entanto, a distribuição de riquezas é tão desigual que, no retorno ao lar, muitos trabalhadores contemporâneos encontram menos comida que seus ancestrais há 500 anos (Harari, 2018).

Enfim, diante de uma lógica de mercado capitalista, e de uma necessidade de proteção ambiental, as energias renováveis tem recebido crescente investimentos, como demonstra a gráfico 6 a seguir:

Gráfico 6 - Tendências de investimento em energia renovável



Fonte: IRENA and CPI, Global Landscape of Renewable Energy Finance 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, acesso em março de 2021.

4.6O Princípio da Responsabilidade

Hans Jonas, em sua influente obra: O Princípio da Responsabilidade (2006), estabelece uma compreensão ética da humanidade com a natureza. Esta relação está pautada no desenvolvimento da técnica e suas consequências.

Contudo, ao se tornar tecnicamente bem-sucedida no domínio da natureza, a humanidade tem como resultado a degradação da natureza. Portanto, compreender a relação da humanidade e o uso inconsequente dos recursos, pelo Princípio da Responsabilidade, impõe uma postura minimamente ética.

Sobre o avanço técnico e suas consequências, Mahatma Gandhi, na luta contra a colonização inglesa na Índia, propôs um recuo na técnica; quando defendia que os indianos voltassem a tecer seus próprios tecidos (Raina, M. K.; Raychaudhuri, S., 2011). Este foi o ponto de partida para a construção de uma nova ética e enfrentamento das relações de subordinação que se estabeleceram diante do domínio inglês.

Já, Hans Jonas, parte da constatação de que a técnica está consolidada, e assim, não podemos evitá-la. Portanto, esta premissa é importante para afirmar a indiferença da técnica com o futuro do meio ambiente, e desta forma também, a indiferença com o futuro da própria humanidade. Neste sentido, o Princípio da

Responsabilidade constitui-se um apelo por coerência, com imperativo da permanência da vida na terra, ou seja, não se pode desenvolver tecnologia indiscriminadamente alheia aos impactos ambientais.

Posto isto, o Princípio da Responsabilidade pode ser considerado o fundamento filosófico do Princípio da Precaução (Hupffer, H. M.; Engelmann, W., 2017). Desta forma, o Princípio da Precaução, historicamente, esteve relacionado à poluição industrial e seus problemas decorrentes. Assim, este princípio alastrou-se para setores causadores de efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Neste contexto, precaução é um dos princípios que guia as atividades humanas e incorpora parte de outros conceitos como justiça, equidade, respeito, senso comum e prevenção (MMA, 2020).

De forma específica, o Princípio 15 (Princípio da Precaução), estabelecido na Conferência no Rio de Janeiro, Rio/92 sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, diz:

"Para que o ambiente seja protegido, serão aplicadas pelos Estados, de acordo com as suas capacidades, medidas preventivas. Onde existam ameaças de riscos sérios ou irreversíveis, não será utilizada a falta de certeza científica total como razão para o adiamento de medidas eficazes, em termos de custo, para evitar a degradação ambiental".

Quando se aplica o Princípio da Precaução, na avaliação de risco de uma atividade utiliza-se perguntas como: Quanta contaminação pode ser evitada enquanto se mantém certos valores? Quais são as alternativas para a atividade? Qual a necessidade e a pertinência da atividade? (MMA, 2020).

Vale lembrar que a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, no artigo 225, fala sobre o direito fundamental de um ambiente ecologicamente equilibrado, tanto aos presentes quanto às futuras gerações. Este direito transcende a esfera pessoal do cidadão (Brasil, 1988). Assim, O Princípio da Precaução funciona como uma espécie de *in dubio pro ambiente*: na dúvida decide-se a favor do ambiente, isto é, o Princípio de Precaução é aplicável quando ainda existe a incerteza (Reichardt, F. V.; Santos. M. R. A. dos, 2019).

Contudo, o desrespeito ao Princípio da Precaução tem exemplos notórios no Brasil. Antes mesmo da entrada em vigor da Lei de Biossegurança, a comercialização da safra de soja transgênica de 2003 foi autorizada por medida provisória, e sem o estudo prévio de impacto ambiental, fato que seguiu na comercialização das safras de 2004 e 2005. Outro exemplo refere-se às propostas do Projeto de Lei (PL) nº 3.729/04, que tem por objetivo "definir parâmetros gerais" que devem ser cumpridos por empreendedores no caso de obras com risco ambiental, reduzindo ou dispensando instrumentos jurídicos de governança socioambiental, como o estudo prévio de impacto ambiental e as audiências públicas. Por fim, outro exemplo de desrespeito e tratamento desigual do princípio de precaução refere-se à proibição da comercialização de produtos de origem animal produzidos pela agricultura familiar, pela vigilância sanitária, em alguns municípios do Mato Grosso. Isto, quando o Mato Grosso é o estado com maior produção de soja do Brasil e, com extensas pulverizações realizada por pequenos aviões. Ora, por qual razão o princípio de precaução alcança o mercado de produtos da agricultura familiar, no entanto, é desconsiderado quando abrange grandes produtores e o uso de agrotóxicos? (Reichardt, F. V.; Santos. M. R. A. dos, 2019).

O debate sobre o descarte ambiental das placas fotovoltaicas está ausente na legislação brasileira. Esta ausência de previsão na legislação sobre o descarte autoriza a transferência de um passivo ambiental dos países produtores para os países consumidores. Contudo, pelo Princípio da Precaução, esta situação deve ser revista.

4.7 A energia fotovoltaica

Avanços tecnológicos previsíveis, aprendizado tecnológico e convergência tecnológica aumentam a probabilidade de um crescimento constante da geração de energia fotovoltaica. Espera-se investimentos de longo prazo para uma transição rápida para as energias renováveis, reduzindo os riscos das mudanças climáticas. Há sim, portanto, evidências credíveis de que a energia solar fotovoltaica global continuaria a crescer perto de taxas históricas até 2030 (Carrington G., Stephenson J., 2018).

Neste sentido, dos avanços na geração renovável, a matriz elétrica brasileira, data de referência 27/10/2020, a energia fotovoltaica contribuía com 8,05% de potência outorgada (<https://app.powerbi.com>), distribuídos espacialmente como demonstra a figura 2 a seguir, onde cada ponto amarelo no mapa corresponde a localização de uma usina fotovoltaica centralizada:

Figura 2– Localização das usinas fotovoltaicas brasileiras



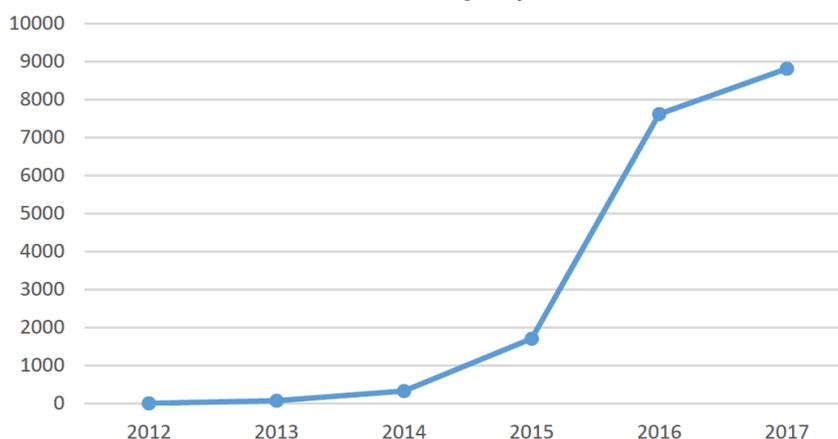
Fonte: <https://app.powerbi.com>, acesso em 27/10/2020.

Do ponto de vista estratégico, para a consolidação de uma indústria de reciclagem no estado do Ceará tem-se a disposição das usinas fotovoltaicas no entorno, dos estados vizinhos e próximos. Deste ponto de análise, por exemplo, o

estado do Pará se consolidará como grande fornecedor de placas fotovoltaicas para reciclagem.

Sobre a evolução da Geração Distribuída (GD), o gráfico 7 a seguir apresenta a evolução do número de unidades consumidoras, no Brasil, com painéis solares fotovoltaicos que participam do sistema de compensação de energia instituído pela Resolução Normativa nº 482 de 2012.

Gráfico 7 - Unidades consumidoras com geração solar fotovoltaica distribuída



Fonte: Nascimento, R. L, 2017.

Contudo, vale lembrar que no final do ano de 2015, a ANEEL publicou a resolução normativa nº 687/2015 que alterou a nº 482/2012. A resolução nº 687/2015 trouxe consigo alterações que proporcionaram maiores atrativos para os consumidores, tornando possível a geração distribuída em condomínios, onde os moradores podem compartilhar a mesma fonte de energia, e também a geração compartilhada, em que consumidores podem se unir em um consórcio para a instalação de micro ou minigeração distribuídas (ANEEL, 2015).

Desta forma, espera-se que, para o Brasil em 2023, teremos 161.360 unidades consumidoras com sistemas fotovoltaicos, sendo 140.011 residenciais e 21.349 comerciais, o que fará com que 0,33% do consumo residencial e 0,33% do consumo comercial sejam atendidos por tais sistemas instalados (EPE, outubro/2014).

A geração distribuída solar encontra-se em estágio avançado de consolidação comercial no Brasil. Considerando-se que o Ceará possui mais de 4 milhões de unidades consumidoras, seu potencial de geração solar distribuída é maior que 2 TWh/ano, somente nas áreas urbanas. A geração distribuída solar rural também apresenta potencial em todo o estado, tendo em vista o abundante recurso, com produtividade fotovoltaica esperada média maior que 1 500 kWh/kWp/ano, valor viável para geração distribuída em qualquer área rural (Schubert, 2019).

Portanto, considerando a demanda de energia elétrica das classes residencial e rural, que somaram 5 281 TWh em 2017, quantas placas seriam necessárias para atender esta demanda? Para isto, tem-se que considerar uma população de estadual de 9 075 649 habitantes, o que corresponde a um consumo médio diário per capita de aproximadamente 1,59 kWh/dia (IPECE, 2019). Tem-se uma insolação média no território de 4,25 Wh/Wp/dia (Schubert, 2019). Ou seja, considerando uma placa solar de 330 Wp (padrão atual do mercado), instalada em condições adequadas, teríamos uma produção de energia em torno de 1,4 kWh/dia. Por exemplo, se fosse instalada uma placa solar padrão para cada habitante, ter-se-ia a capacidade de suprir, na

média, 88% da demanda energética individual de um cearense (Schubert, 2019). Desta forma, além de grande potencial, a geração distribuída apresenta outras vantagens como a proximidade da carga ao consumidor, a possibilidade de uso de áreas de telhados, áreas urbanas ou altamente antropizadas.

Contudo, qual seria a importância da energia solar para um condomínio abastecido por gás natural, já que, atualmente, 17% de toda a demanda da Companhia de Gás do Ceará (CEGÁS), é atendida pelo biometano do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC) (<https://www.seinfra.ce.gov.br/2019/10/01/cegas-e-gnr-assinam-contrato-para-ampliar-a-oferta-de-gas-natural-renovavel-no-ceara/>, acesso em 07/07/2021)? Classificar os condomínios como utilizadores de energia sustentável, baseando-se na utilização de biometano advindo do aterro, tornaria desnecessário discutir os impactos dos resíduos solares, visto que ambos utilizariam energia limpa. No entanto, os aterros também são a remediação de uma situação inadequada dos resíduos, principalmente quando não se tem uma sólida estrutura de segregação dos materiais, seguida de recuperação e reciclagem.

Já sobre a Geração Centralizada (GC), para o estado do Ceará, temos as seguintes situações conforme a tabela 1 a seguir: Empreendimentos previstos, em construção e operação. Esta classificação corresponde à realidade cearense diante da propriedade de cada usina.

Tabela 1 – Empreendimentos fotovoltaicos no Ceará por proprietário*

Lista por proprietário	Total	Potência Outorgada (kW)
usinas em operação por proprietário	8	218.000
usinas em construção por proprietário	9	278.397
usinas previstas por proprietário	52	1.942.756

Fonte: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021

*No Anexo A encontra-se lista completa dos empreendimentos.

4.8 A expansão

A produção de energia através da radiação solar está subordinada a uma variabilidade de condições, como por exemplo, cobertura de nuvens, concentração de gases atmosféricos; além de fatores astronômicos, que estão associados aos movimentos de rotação e translação do planeta. Isto, sem falar em condições de ordem financeira e política, exploradas anteriormente. Além do mais, para o desenvolvimento dessa fonte de energia, são necessários projetos de plantas fotovoltaicas adequadamente elaborados, observando-se o dimensionamento correto, e demais fatores, para o aproveitamento dessa fonte de energia.

Portanto, deve-se levar em consideração um conjunto de informações das mais diversas para adequação da energia solar fotovoltaica. Estas informações de ordem: atmosféricas, astronômicas, financeiras, políticas e de engenharia são imprescindíveis. Notadamente, a matriz energética do Brasil é considerada renovável, já que cerca de 80% corresponde a geração de energia por hidroelétricas. Contudo,

diante de um quadro de escassez hídrica, como ocorreu entre 2011 e 2015, anos com baixa pluviometria, as emissões de carbono na geração de energia elétrica subiram de 82 para 137 kgCO₂/MWh, devido a maior utilização de usinas termoelétricas, movidas à combustíveis fósseis.

A rápida expansão da capacidade instalada nos últimos anos, atrelada à forte redução de custos, o imenso potencial técnico de aproveitamento e o fato de não emitirem poluentes durante sua operação, fez com que o mundo voltasse sua atenção para a energia solar como alternativa de suprimento elétrico.

A capacidade fotovoltaica instalada global atingiu cerca de 400 GW no final de 2017 e deverá aumentar ainda mais para 4500 GW até 2050. Considerando uma vida útil média do painel de 25 anos, prevê-se que os resíduos solares fotovoltaicos mundiais atinjam entre 4% e 14% da capacidade total de geração em 2030 e aumentará para mais de 80% (cerca de 78 milhões de toneladas) até 2050 (Chowdhury, et. al., 2020).

No mundo, a geração elétrica fotovoltaica cresceu de 3,7 GW, em 2004, para 177 GWp em 2014. Isto representa um crescimento anual de 47% (IREN21, 2015).

Já Yan Xu (2018), compara com IREN21 (2015) citado logo acima, apresenta dados mais modestos para a expansão fotovoltaica: segundo este autor, a demanda global por energia fotovoltaica aumentou de 1 GW (GW) em 2004 para 57 GW em 2015: uma taxa de crescimento anual de mais de 20%, mais rápida do que qualquer outra indústria, incluindo outras indústrias emergentes de energia renovável. Desta forma, o crescimento da geração de energia fotovoltaica é vertiginoso, como mostra o gráfico 8 a seguir, apesar da discrepância encontrada comparando-se os dados fornecidos por IREN21 (2015) e Yan Xu (2018).

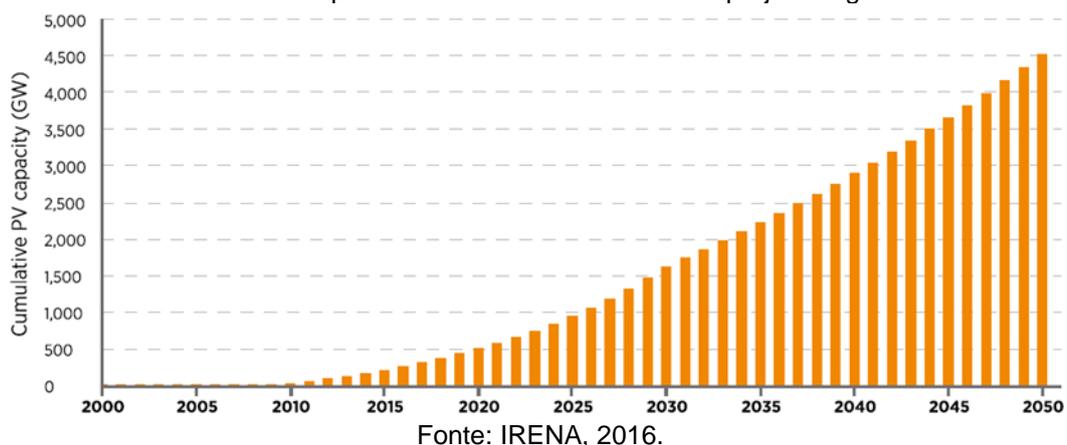
Gráfico 8 - Geração de eletricidade solar fotovoltaica, Mundo 1990-2018



Fonte: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, acesso em 31/03/2021.

Desta forma, a contribuição da geração fotovoltaica para a produção elétrica global deve atingir 16% até 2050. Este é um aumento de 135 GW em 2013 até um máximo de 4.674 GW de capacidade fotovoltaica instalada em 2050, como mostra a gráfico 9 a seguir:

Gráfico 9 - Capacidade fotovoltaica cumulativa projetada global



Portanto, a quantidade de painéis fotovoltaicos instalados globalmente tem crescido rapidamente. Com uma vida útil de aproximadamente 25 anos, espera-se um total de 9,57 milhões de toneladas de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050 (Monier e Hestin, 2011).

Vale lembrar a importância das projeções estatísticas otimistas para as energias renováveis, quando se refere aos investidores. Estas projeções otimistas tem aspectos cognitivos sobre as atitudes dos investidores, que se sentem mais seguros. Por sua vez, o volume de investimentos reforça o caráter otimista das projeções (Baker, H.K.; Ricciardi, V. (Eds.), 2014; Wüstenhagen, R.; Menichetti E, 2012).

Contudo, um aspecto merece destaque sobre as projeções das energias renováveis: a princípio, os dados atuais são um alerta precoce de um fosso crescente entre ambições expressas e o crescimento real das fontes renováveis. Ao considerar a proporção de energia produzida vs. investimentos em grandes sistemas de energia renováveis, estudos preveem um nível ótimo na produção global de energia renovável bem abaixo do que é necessário para satisfazer a demanda global (Hansena J.P et. al., 2017).

4.9 As diferentes tecnologias fotovoltaicas

A trajetória tecnológica dos sistemas fotovoltaicos pode ser apresentada em quatro fases (Tolmasquim, 2016):

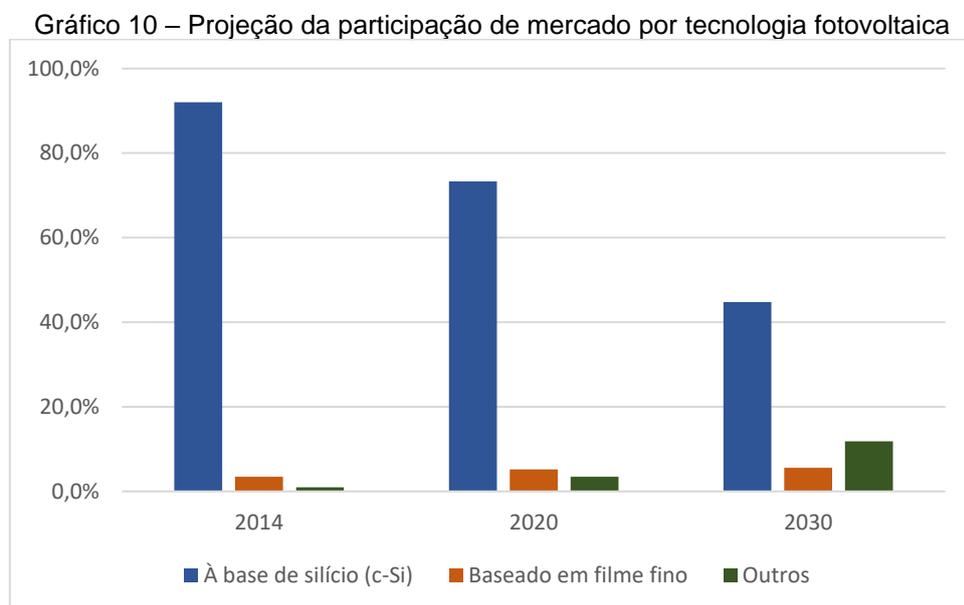
Fase 1 - As células fotovoltaicas eram utilizadas em aplicações espaciais;

Fase 2 - Como consequência das crises do petróleo, durante a década de 1970, a geração de energia fotovoltaica mostrou viabilidade econômica no atendimento de áreas isoladas, com o apoio de baterias;

Fase 3 - Alguns países lançaram programas de estímulo à geração fotovoltaica conectada à rede, ainda no final da década de 1990, em conjunto com o pagamento de tarifas-prêmio pela energia gerada por esses sistemas. Tais medidas levaram a uma forte redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, contribuindo para o desenvolvimento da geração distribuída, realizada sob os telhados das edificações;

Fase 4 - A energia fotovoltaica tornou-se competitiva, avançando na modalidade de geração centralizada também, com o projeto de grandes usinas solares.

Atualmente, quanto as diferentes tecnologias disponíveis no mercado, temos as seguintes participações e suas projeções, como demonstra o gráfico 10 a seguir:



Fonte: IRENA, 2016 (adaptado)

Como pode-se perceber, os painéis à base de silício, além de serem a tecnologia fotovoltaica mais antiga, atualmente dominam o mercado com cerca de 92%, e ainda repercutem uma extensa participação projetada para as próximas décadas.

Desta forma, como existe uma expectativa global de uma resposta sobre os resíduos fotovoltaicos, principalmente de países com metas mais ambiciosas de transição para sistemas energéticos renováveis, planejar o descarte coloca o Ceará em harmonia com as demandas mundiais legítimas e pioneiras. Contudo, o aumento de resíduos de painéis fotovoltaicos apresenta um novo desafio ambiental, mas também, apresenta oportunidades para criação de valor e busca por novos caminhos de desenvolvimento econômicos através da reciclagem e recuperação de materiais.

No mais, pensando-se as projeções do desenvolvimento das tecnologias fotovoltaicas, não se pode deixar de mencionar as células solares de perovskitas (PSCs). Descobertas por Gustav Rose, em 1839, as perovskitas representam uma classe de materiais com características únicas que hoje estão revelando inúmeras e versáteis aplicações em uma ampla gama de dispositivos tecnológicos (Giorgi, G. et. al., 2015). Nisto, no desenvolvimento de novos dispositivos, a qualidade do filme desempenha um papel fundamental para alcançar alta eficiência em células solares de perovskitas, necessitando, assim, de uma maior compreensão dos mecanismos de formação do filme (Perumallapelli, G. R. et. al., 2016).

As células solares de perovskitas baseiam-se em haletos orgânico-inorgânicos, que têm chamado a atenção da comunidade científica nos últimos anos por chegar à eficiência superior a 20% com apenas meia década de estudos. Além de terem alta eficiência, as PSCs podem ser preparadas com materiais e técnicas de baixo custo, tornando-se extremamente interessantes para comercialização em larga escala (Raphaela, E. et. al., 2018). Atualmente, sabe-se que a sua capacidade de converter

luz em eletricidade é maior ainda quando elas são empilhadas em cima de células solares de silício, formando uma junção de dispositivos chamada “tandem”. Todavia, esses bons resultados correspondem geralmente a dispositivos pequenos, usados para pesquisa em laboratório. Conseguir produzir grandes áreas de perovskitas sem prejudicar a eficiência ainda é um desafio. Entretanto, descobertas recentes fornecem um entendimento profundo sobre o mecanismo de formação em perovskitas e contribuem para escolha do solvente mais adequado para a composição de células solares em tandem de perovskita sobre silício (Szostak, R. et. al., 2020).

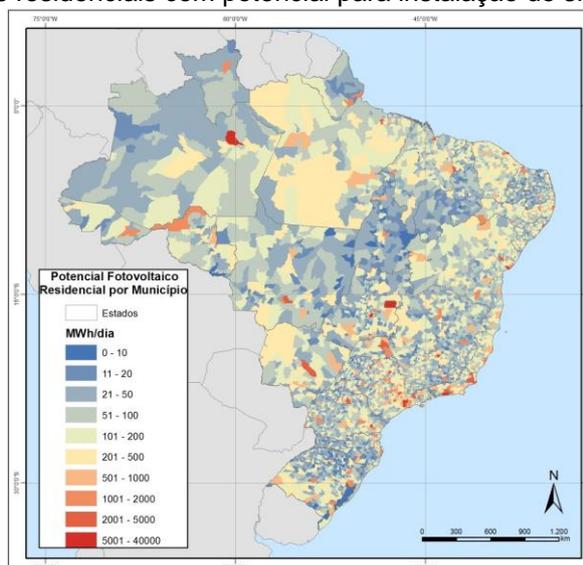
4.10 A geração

No Brasil, as primeiras aplicações da energia solar fotovoltaica aconteceram em sistemas isolados, especialmente no Norte do país, em programas de eletrificação rural para comunidades remotas, sendo empregados principalmente para bombeamento de água e iluminação pública. Com o impulso recebido pelo Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), entre 1994 e 2002 foram instalados 7 592 projetos fotovoltaicos, dos quais 733 foram estabelecidos no Ceará (ANEEL, 2005).

Agora, pensando-se na geração distribuída, realizada nos telhados das edificações, por exemplo, um outro estudo, realizado na cidade do Rio de Janeiro, aprimorou a metodologia de mapeamento das áreas dos telhados de edificações residenciais com potencial para aproveitamento de instalação de sistemas energéticos fotovoltaicos (Lange; Vasconcelos, 2015). Este estudo também embasou o desenvolvimento de um aplicativo para celular com o objetivo de tornar públicos os dados da pesquisa, e assim, promover o debate sobre as energias renováveis e eficiência energética. Trata-se do Mapa do solar do Rio de Janeiro, disponível no endereço eletrônico <http://pcrj.maps.arcgis.com/apps>.

Ainda em parceria com a Agência de Cooperação Internacional da Alemanha (GIZ), a metodologia aplicada na cidade do Rio de Janeiro foi ampliada para grandes cidades do país, originando a figura 3 a seguir:

Figura 3 - Telhados residenciais com potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos



Fonte: EPE, 2014.

Um outro aspecto relacionado a energia fotovoltaica, especialmente sobre a geração distribuída, corresponde a relação entre o consumidor final e a concessionária de energia. Estas concessionárias de energia podem estender a oferta dos serviços de fornecimento de energia através da instalação de sistemas fotovoltaicos no telhado nas edificações dos consumidores finais. As concessionárias distribuidoras de energia são o caminho natural de entrada da geração solar fotovoltaica distribuída e a oferta desta tecnologia (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Com isto, em 2019, o mercado de energia solar no Brasil cresceu mais de 212%, alcançando a marca de 2,4 GW instalados. Segundo a ANEEL, foram instalados mais de 110 mil sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração (<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>), acesso em 12/08/2020).

Deve-se ressaltar que, as regiões Norte e Nordeste, mais próximas da linha do equador, apresentam maior facilidade para o aproveitamento dos sistemas de geração fotovoltaico nas edificações devido o ângulo de incidência solar verificado pela aproximação com a linha do equador, o que no sul do país necessita de um posicionamento mais específico dos painéis para um aproveitamento adequado da irradiação solar (SANTOS, 2013).

Neste sentido, para o Ceará temos a seguinte avaliação de áreas para instalações de energia fotovoltaica em grande escala, que levou em consideração a localização de plantas urbanas, rodovias, corpos hídricos, declividade do terreno, encontrando espaços propícios para a implantação, como resultado está a figura 4 a seguir:

Figura 4: Áreas para instalação de energia fotovoltaica em grande escala no Ceará



Fonte: ALMEIDA, 2018.

Ainda para o Ceará, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tem-se um potencial instalado de 22,9 megawatts (MW), equivalente a 3,6% da matriz energética. Ainda assim, o território cearense ocupa a oitava posição no ranking do país, enquanto sua capital conta com 8,1 MW de potência instalada, que corresponde a 1,3%, ocupando a sexta colocação no ranking municipal. Além disso, seu potencial de geração de energia solar é 30 vezes maior que a capacidade instalada no Brasil (Schumbert, 2019).

Portanto, correspondendo a 10% da matriz energética e fotovoltaica instalada no Brasil, o território cearense é o terceiro colocado em relação ao maior potencial de energia solar no Nordeste, ficando atrás apenas da Bahia e do Piauí. Sendo assim, estima-se que o estado quadruplicará sua capacidade de geração de energia em sistemas fotovoltaicos até 2023. Tendo em vista os leilões já realizados, serão incluídos mais 757 MW, o que totalizará 975 MW de potência instalada (<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-no-ceara>, acesso em 12/08/2020).

Já para a geração fotovoltaica centralizada sobre corpos hídricos, desenvolvidos em sistemas flutuantes, o argumento de que a evaporação da água melhora a eficiência resfriando o sistema fotovoltaico tem sido questionado (ALENCAR FILHO et al., 2018).

No entanto, quando se fala de sistemas *off-shore*, sobre o mar, além da discussão sobre o ganho de eficiência, têm-se outras questões: investimento em flutuadores e ancoragem, severidade do ambiente marinho para os materiais, o que encarece o investimento e a manutenção. Além da questão orçamentaria, e da insegurança dos dados de irradiação solar *off-shore*, mesmo com grande potencial, esta modalidade de geração precisa ser melhor analisada no futuro (EPE, 2018).

4.11 Custos e criação de valor

Tem-se assistido à queda do preço médio do módulo fotovoltaico à medida que a tecnologia e a demanda por esse tipo de geração aumentam. Assim, com a acentuada redução de custos experimentada pela tecnologia fotovoltaica nos últimos anos, o cenário favorece à sua adoção em escala crescente (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Vários fatores permitiram a redução dos custos da geração fotovoltaica: maior eficiência através da inovação tecnológica, interseção de conhecimento com tecnologias, redução do custo das matérias-primas e aumento do investimento na indústria (Pillai, U., 2015).

Com isto, verifica-se que o preço dos módulos solares fotovoltaicos sofreu uma redução de mais de dez vezes em dez anos, de cerca de US\$ 3,90/Wp em 2006 para menos de US\$ 0,39 em 2016 (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Além do mais, as oportunidades de criação de valor existem em todo segmento da cadeia fotovoltaica. Assim, oportunidades anteriores ao descarte estão relacionadas a reduções no uso de materiais, opções de reparo, reutilização e no desenvolvimento da reciclagem. Tudo isto diante dos princípios de redução de resíduos: reduzir, reutilizar e reciclar.

Assim, é indispensável projetar e planejar sobre a disponibilidade de material para fabricação dos painéis fotovoltaicos, que pode impor limitações para a produção e desenvolvimento do setor fotovoltaico. Estas limitações podem gerar aumentos no custo da produção, que por sua vez trará maior incentivo para processos de mineração eficientes, o que inclui extração dos metais mais utilizados, como prata, alumínio, cobre e estanho (Marini et al., 2014; Marwede, 2013; Zimmermann, 2013; Taoa, Jiang and Taoa, 2011; Erdmann, 2011). Além de um evidente incentivo para recuperação dos materiais através da reciclagem.

Assim, prevendo-se a necessidade indelével da reciclagem, estima-se que mais de 80% dos componentes fotovoltaicos em fim de vida útil serão reciclados. Além disso, uma associação mundial, a *PV Cycle*, antecipa que a indústria de reciclagem de painéis fotovoltaicos renderia 12 bilhões de dólares até 2035 (Yan Li et. al., 2019).

4.12 Abordagem regulatória em diferentes mercados

Os marcos regulatórios procuram garantir o gerenciamento sustentável dos produtos, possibilitando a viabilidade econômica, processos ambientalmente adequados e tecnologias eficientes para recuperação de materiais. Desta forma, sobre os marcos regulatórios, a União Europeia (UE) foi pioneira na regulamentação dos painéis fotovoltaicos classificando como lixo eletrônico, obrigando a coleta, recuperação e reciclagem. Assim, com base no princípio da responsabilidade estendida ao produtor, exige-se que todos produtores que fornecem painéis fotovoltaicos para o mercado da UE, onde quer que estejam baseados, financiem os custos de coleta e reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim de vida colocados no mercado europeu.

O risco dessa ação, de classificar os resíduos solares como lixo eletrônico, reside no momento de aplicação dos regulamentos no Brasil. O funcionamento frouxo das fiscalizações, isto quando realmente ocorrem, deve contribuir, neste contexto de descumprimento da lei ou de raleamento na sua aplicação e fiscalização, para que surjam empresas de atuação duvidosa em termos dos cumprimentos legais ambientais. Esta realidade é relatada por Zhang et. al. 2012, quando discorrem sobre a reciclagem de lixo eletrônico, em um estudo de caso, realizado na China.

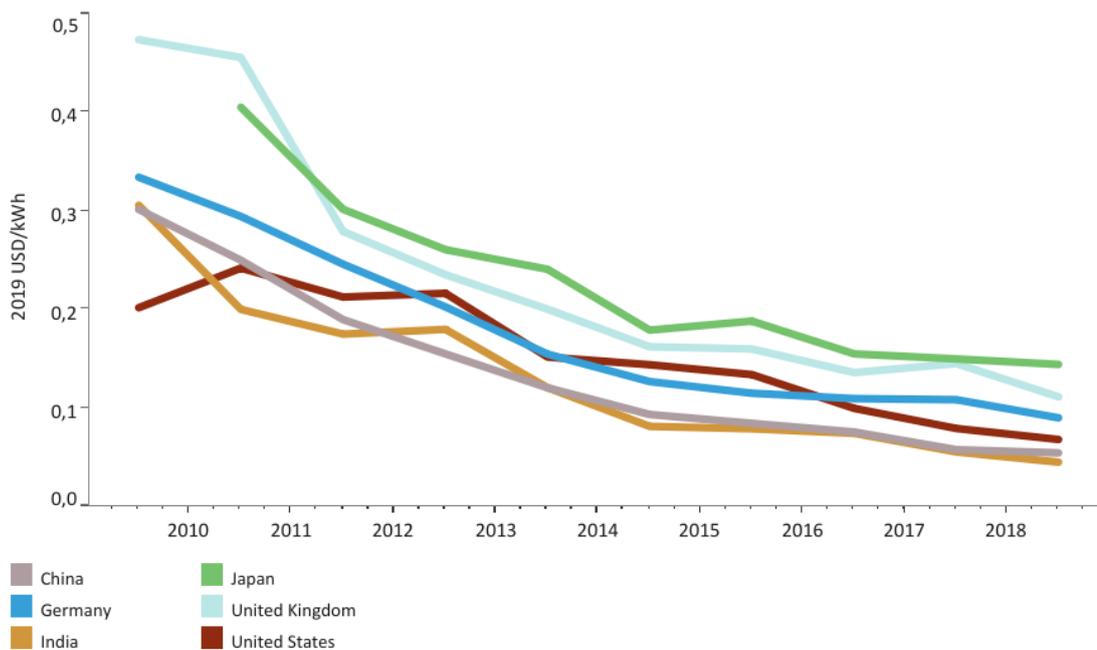
Além do mais, no Brasil, deve-se lembrar que, através da Resolução Normativa 482/2012, adotou-se o mecanismo de compensação de energia. Através desse mecanismo, o gerador de energia fotovoltaicos, não recebe pela energia que gerou, mas é compensado na hora de pagar sua conta para a concessionária. Caso se produza mais do que se consome, o excedente é injetado na rede elétrica, que funciona semelhante a uma bateria, retornando energia para ser consumida a noite, quando não tem produção do sistema fotovoltaico. No mais, o limite da compensação era de 1000 kWp, contudo, este limite foi ampliado pela REN 687/2015 para até 5000 kWp por Unidade Consumidora (o que equivale ao consumo médio de mais de mil residências de classe média no Brasil). Desta forma, pode-se gerar energia em um lugar, um sítio por exemplo, e utilizar os créditos da geração em uma outra conta de energia, desde de que seja da abrangência da mesma concessionária distribuidora. Com esta flexibilização, ocorrida na REN 687, a ANEEL estima que até 2024, serão instalados mais de 1,2 milhão de geradores solares fotovoltaicos classificados de micro e mini geração distribuída. Esta estimativa corresponde a uma potência máxima

de 5 MWp. Os créditos de energia injetados na rede elétrica têm validade de 60 meses para serem compensados (ENEEL, 2017).

Já quando se trata dos leilões específicos de energia fotovoltaica promovidos pelo Governo Federal, a partir de 2014, referentes a usinas de grande porte, que correspondem a centenas de MWp, a contratação desta modalidade de energia tem ocorridos em lotes que comumente ultrapassam 1 GWp por leilão. Diferentemente da geração distribuída, a geração solar fotovoltaica centralizada tem se concentrado nas áreas mais ensolaradas do país, onde, além da disponibilidade do recurso solar, também o custo da terra deve ser levado em conta (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Outro aspecto, relacionado aos custos, reside na observação da abordagem em diferentes territorialidades nacionais para um diagnóstico geral dos caminhos e descaminhos que seguem as nações no enfrentamento da problemática dos resíduos da geração de energia a partir da fonte solar. De início, para a construção do quadro dos países anotados no gráfico 11 a seguir, que aponta os custos para este tipo de geração ao longo do tempo.

Gráfico 11 – Custos da geração fotovoltaica



Fonte: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>, acesso em outubro de 2020.

A projeção da redução dos custos da geração corrobora sobre a expansão da geração fotovoltaica, de modo que haverá a ampliação dos resíduos, e a convecção de uma abordagem correspondente a este quadro de expansão fotovoltaica.

No mais, faz-se necessário esclarecer os conceitos utilizados como referência para produção de resíduos fotovoltaicos, assim temos:

- Perda regular: considera uma vida útil de 30 anos;
- Perda precoce: considera falhas ou desgaste antes da vida útil de 30 anos.

Sobre a perda precoce vale salientar que, de acordo com uma pesquisa recente com usuários de energia solar em nove municípios do Quênia, quase um quinto dos

produtos solares pararam de funcionar após 18 meses de compra (Cross, J.; Murray, D., 2018).

Outro aspecto sobre a remoção precoce dos painéis fotovoltaicos, ou seja, antes chegar ao fim da vida útil, não apenas por falhas técnicas ou incidentes ocorridos durante percurso, instalação ou algum outro evento, como objetos arremessados ou intemperes climáticas, granizo, por exemplo. Neste contexto, da remoção precoce, ocorre de instalações fotovoltaicas serem vistas como itens de consumo que, portanto, podem ser atualizados com frequência dissonante da sua vida útil, gerando maior volume de recursos e resíduos. Para isto, faz-se necessário um programa de conscientização pública que explique aos consumidores que os painéis solares não são como telefones celulares e não precisa ser substituído com poucos anos de uso (Mathur, D. et. al., 2020).

a) União Europeia (UE)

Na União Europeia, os produtores que desejam colocar produtos no mercado são legalmente responsáveis pela gestão de fim de vida, não importa onde a fabricação está localizada (European Commission, 2013). Esta combinação de responsabilidade legal do produtor pelo produto no fim de vida, coleta, recuperação e metas de reciclagem e requisitos mínimos tratamento, procura garantir a proteção ao meio ambiente e a saúde humana, tudo isto baseado no princípio de responsabilidade.

Relevante lembrar que, na Europa, a exportação de resíduos é proibida. Além das implicações econômicas, ambientais e sociais desta proibição, ocorre o incentivo para a reciclagem dos componentes da energia solar fotovoltaica (Paiano, 2015).

O relatório dos equipamentos elétricos eletrônicos foi revisado e entrou em vigor em 13 de agosto de 2012, sendo implementado pelos estados membros da UE em 14 de fevereiro de 2014 e, assim, introduziu uma nova estrutura para resíduos de painéis fotovoltaicos. Cada um dos 28 estados membros da UE agora são responsáveis por estabelecer o regime de coleta e tratamento do painel fotovoltaico em de acordo com a diretiva (European Parliament and Council, 2012).

Assim, a União Europeia adotou a reciclagem de alto valor, que passou a ser a base para a diretiva dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE), e garante o seguinte:

- substâncias potencialmente prejudiciais (por exemplo, chumbo, cádmio, selênio) serão removidos durante o tratamento;
- materiais raros (por exemplo, prata, telúrio, índio) serão recuperados e disponibilizados para uso futuro;
- materiais com alto valor de energia embutido (por exemplo, silício, vidro) serão reciclados;
- os processos de reciclagem levarão em consideração a qualidade de material recuperado (por exemplo, vidro).

A Comissão Europeia também pediu ao Comitê Europeu de Eletrotécnica Padronização para desenvolver critérios específicos e qualitativos para estabelecer padrões de tratamento de reciclagem (Comissão Europeia, 2013). Como parte desse pedido, está em desenvolvimento um suplemento de padronização para coleta e

tratamento dos painéis fotovoltaicos (European Committee for Electrotechnical Standardization CLC/TC 111X, 2015).

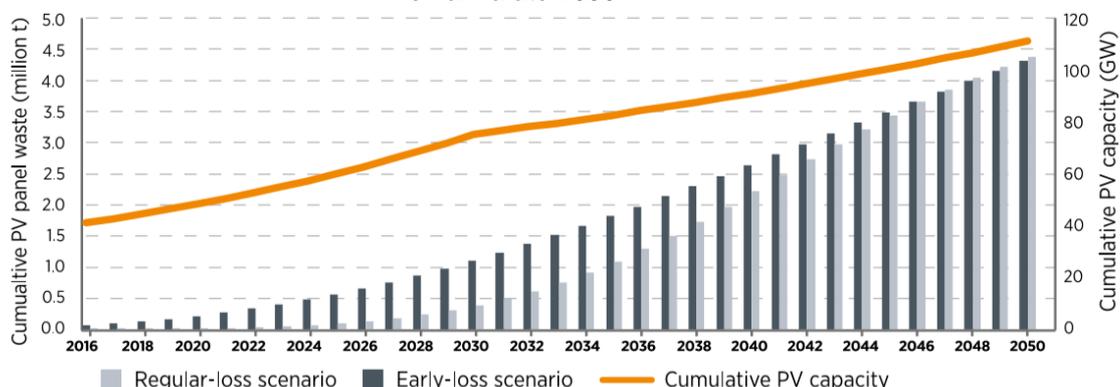
Para cumprir as ambiciosas metas da Diretiva WEEE de reciclagem, a partir de 2016, começou-se a incorporar os painéis fotovoltaicos no sistema de gestão de resíduos, novo ou já existente. Vários esquemas nacionais já administram partes do fluxo de resíduos elétricos e eletrônicos por anos, organizando coleta, tratamento, reciclagem e relatórios aos reguladores. Eles podem servir como uma referência importante para gerenciar fluxos crescentes de resíduos do painel fotovoltaico.

b) Alemanha

Na Alemanha reside um mercado maduro com regulamentos específicos para resíduos fotovoltaicos. O início da história do mercado fotovoltaico no país esteve ligado a produção fotovoltaica descentralizadas (IRENA, 2016). Em 2015, os painéis fotovoltaicos contribuíram com 6% da eletricidade consumida na Alemanha, o que correspondeu a quase 40 GW da capacidade instalada total, estando distribuídos em 1,5 milhão de plantas de geração de energia fotovoltaica (IRENA, 2016b e Wirth, 2016). Neste contexto, a Alemanha era o maior mercado fotovoltaico do mundo por duas décadas consecutivos, contudo, em 2015 foi ultrapassada pela China. Diante disto, espera-se que a Alemanha, com o aumento da quantidade de resíduos, veja os custos da indústria de reciclagem diminuir, uma vez que tenha passado por uma curva de aprendizado. Esta tendência já foi observada em outros fluxos de resíduos eletrônicos (IRENA, 2016).

Para a Alemanha, desde o início da sua experiência, a expectativa dos volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida pode variar entre 3.500 e 70.000 toneladas até 2016. Isto corresponde à sua capacidade fotovoltaica, instalada de modo incipiente, comparada ao contexto mundial. A gráfico 12 a seguir projeta as quantidades de resíduos esperadas de acordo com cenário de perda regular e perda precoce. Neste contexto, a Alemanha será claramente um dos primeiros e maiores mercados de reciclagem fotovoltaica e suas tecnologias nos próximos anos.

Gráfico 12 – Projeção de volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para a Alemanha até 2050



Fonte: IRENA, 2016.

Na Alemanha, está sob a responsabilidade dos produtores a reciclagem e descarte dos resíduos eletrônico desde março de 2005, de acordo com a Lei de

Equipamentos Eletrônicos (ElektroG, 2005). A gestão de lixo eletrônico da Alemanha é regulamentada pelo Registro Nacional de Resíduos de Equipamentos Elétricos (Stiftung Elektro-Altgeräte Register ou Stiftung EAR). Assim, a Stiftung EAR é independente em termos de financiamento e pessoal. Seu trabalho é financiado por taxas e despesas definidas pela regulamentação de custos do Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (Bundesumweltministerium)

A Stiftung EAR executa as seguintes funções para todos Produtores de resíduos eletrônico, incluindo produtores de painéis fotovoltaicos:

- registra os produtores que colocam eletrônicos no mercado da Alemanha;
- coleta dados sobre as quantidades de resíduos eletrônicos colocados no mercado;
- coordena o fornecimento de recipientes para devolução de resíduos eletrônico;
- relata o fluxo anual de materiais para o Agência Federal do Meio Ambiente;
- garante que todos os produtores registrados participem das definições internas das regras.

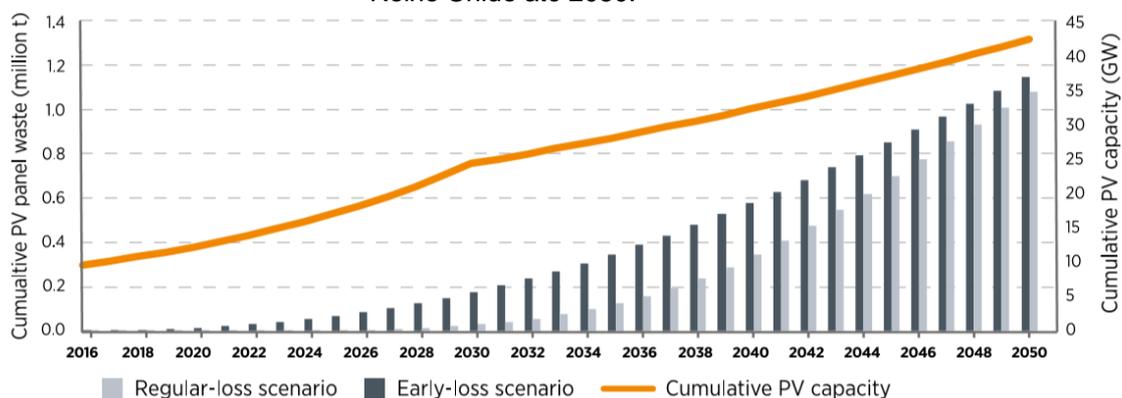
A Alemanha também estabeleceu uma coleta separada por categoria para painéis fotovoltaicos e, portanto, fornece pontos de coleta e tratamento municipais. Isso significa que, qualquer proprietário de painel fotovoltaico, pode levar o resíduo para ponto de coleta municipal, onde será aceito livre tributos. Este é o caminho de descarte aberto para clientes privados que possuem sistemas fotovoltaicos residenciais.

Desta forma, por exemplo, um indivíduo pode dirigir-se a um sistema de coleta e reciclagem ou aderir a uma cooperativa. De qualquer forma, os custos de coleta e reciclagem dos resíduos são distribuídos entre todos os participantes registrados do mercado de acordo com o volume coletado. Isso garante que resíduos históricos ou resíduos órfãos, fabricados por produtores já extintos, seja coletado e tratado. Se um produtor demonstrar que coletou e reciclou sua parte individualmente, esse volume será deduzido da fração remanescente. Se um produtor desaparece do mercado, sua participação de mercado será assumida pelos outros, junto com a responsabilidade para o financiamento da coleta e reciclagem. Já para volumes de resíduos fotovoltaicos de grande escala cabe as partes envolvidas acordar, seja pela contratação para coleta e reciclagem, seja buscando ofertas competitivas pelos resíduos (IRENA, 2016).

c) Reino Unido

O Reino Unido ainda é um mercado relativamente jovem para geração de energia fotovoltaico, e, portanto, para painéis em fim de vida. No entanto, recentemente experimentou rápida implantação. A gráfico 13, a seguir, exibe a expectativa dos volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos, em fim de vida, previsto para o Reino Unido.

Gráfico 13 – Projeção de volume de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para o Reino Unido até 2050.



Fonte: IRENA, 2016.

Como o mercado fotovoltaico do Reino Unido ainda é jovem, tem-se seguido a Diretiva dos resíduos eletrônico eletrônico (WEEE) da União Europeia para coleta, tratamento e reciclagem.

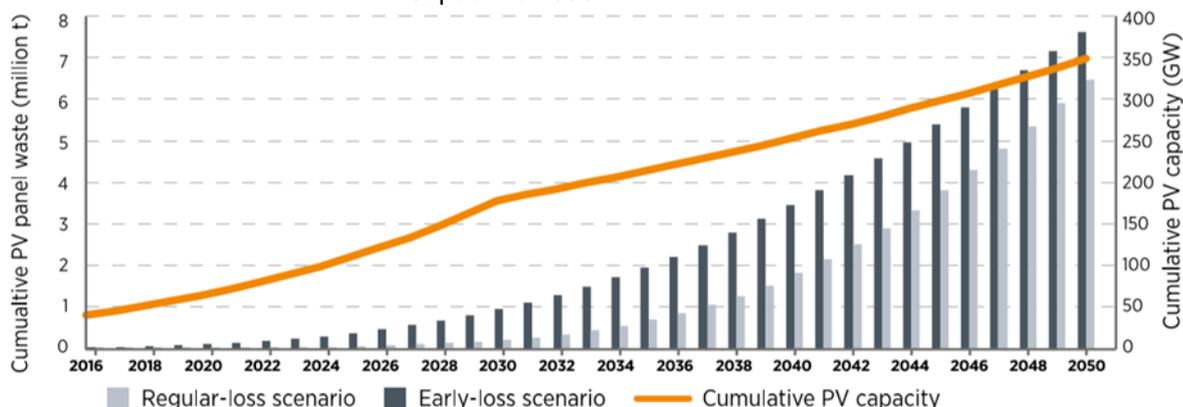
O Reino Unido estabeleceu algumas regras específicas para definir quem é produtor de painéis fotovoltaicos. Assim, ampliando o conceito de produtor também para os importadores, os produtores fotovoltaicos no Reino Unido, são obrigados a financiar a coleta dos painéis fotovoltaicos, de uso doméstico ou não. Por exemplo, um produtor que coloca 10% (por peso) de novos painéis no mercado do Reino Unido em qualquer ano paga pela coleta e tratamento de 10% de painéis antigos recolhidos no ano seguinte. O ano quando foram colocados pela primeira vez no mercado é ignorado (IRENA, 2016). Assim, foi criada uma categoria especial para enquadrar os produtores fotovoltaicos. A criação de uma categoria separada, para o setor da cadeia da geração de energia fotovoltaica, deu aos participantes mais controle sobre o financiamento dos sistemas fotovoltaicos e sobre a reciclagem (UK Department for Business, Innovation and Skills, 2013).

Além da conformidade do produtor, no Reino Unido, a legislação WEEE introduziu um novo requisito para que os instaladores se juntem ao esquema de devolução do produtor. Desta forma, o Reino Unido estabeleceu diversas formas de conformidade e devolução, onde prestadores de serviços oferecem sua mão de obra com taxas semelhantes (UK Environment Agency, 2015).

d) Japão

O Japão foi pioneiro na fabricação de sistemas fotovoltaicos, contribuindo substancialmente por décadas no desenvolvimento de designe, além de ser residência de diversos fabricantes líderes (por exemplo, Sharp, Kyocera e Panasonic), correspondendo a um mercado avançado, mas sem regulamentos específicos para resíduos fotovoltaicos. Embora o mercado interno seja relativamente pequeno, há uma tarifa feed-in (é um mecanismo de incentivo de adoção de energias renováveis por meio da criação de uma legislação que obrigue as concessionárias regionais e nacionais a comprarem eletricidade renovável em valores acima do mercado). Esta tarifa, introduzida em julho de 2012, estimulou uma rápida expansão. A gráfico 14 abaixo demonstra as estimativas para os resíduos dos painéis fotovoltaicos.

Gráfico 14 – Projeção de volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida para o Japão até 2050



Fonte: IRENA, 2016.

Já que o Japão não tem regulamentações específicas para o fim de painéis fotovoltaicos em fim de vida, os resíduos são tratados no âmbito do quadro geral da gestão de resíduos, ou seja, de acordo com a Gestão de Resíduos e a Lei Pública de limpeza (METI e MOE, 2015). Desta forma, os resíduos fotovoltaicos foram enquadrados como material de construção, e assim, exige-se reciclagem. No entanto, como os componentes do sistema não estão sujeitos à lei, não ocorrem obrigações e nem penalidades (METI, 2015).

Neste contexto, em busca de regulamentos específicos, em junho de 2015, foi produzido um roteiro para promover um esquema de coleta, reciclagem e tratamento adequado dos painéis fotovoltaicos em fim de vida. A primeira edição das diretrizes foi publicada em abril de 2016 (METI e MOE, 2016). As diretrizes cobrem informações básicas, como legislação pertinente e regulamentos sobre desativação, transporte, reutilização, reciclagem e destinação dos resíduos. Espera-se o reconhecimento da questão, a partir da publicação das diretrizes, em favor de políticas de gerenciamento de fim de vida dos resíduos de painéis fotovoltaicos.

Atualmente, no Japão, apesar de legislação menos avançada em termos de definição, ocorre o desenvolvimento de diversas tecnologias de reciclagem para os materiais fotovoltaicos. Contudo, avaliando a perspectiva da consolidação da reciclagem globalmente, o projeto de reciclagem japonês foi o único que inseriu a preocupação com uma contribuição para um sistema social (Komoto, 2014), ou seja, percebendo as possibilidades sociais da reciclagem.

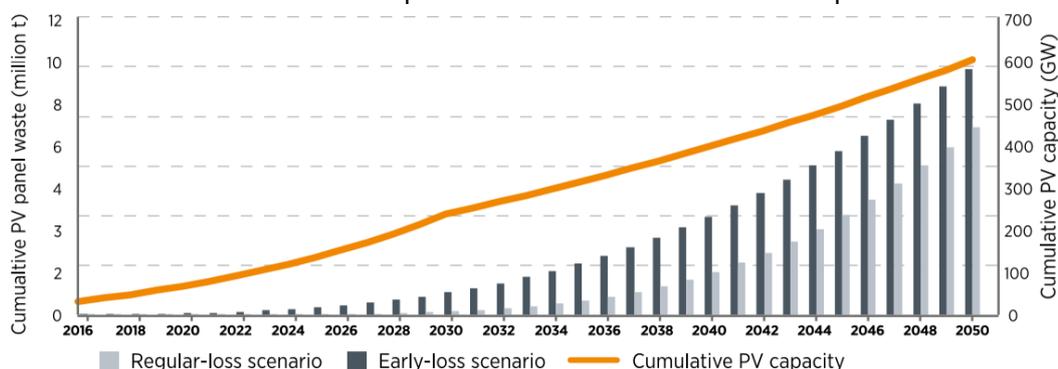
Por fim, uma pesquisa constatou que, as soluções ambientais da Toshiba, levarão aproximadamente 19 anos para reprocessar todo os resíduos fotovoltaicos do Japão produzido até 2020 (Komoto, 2018).

e) EUA

Desde meados dos anos 2000, o mercado fotovoltaico dos EUA vem crescendo rapidamente, e capacidade instalada cumulativa atingiu mais de 25 GW no final de 2015, o que representa o quarto maior mercado de fotovoltaico do mundo depois da China, Alemanha e Japão (IRENA, 2016b), no entanto, sem regulamentos específicos de resíduos fotovoltaicos. A expectativa é que os resíduos em 2030 atinjam entre

170.000 e 1 milhão de toneladas, e então, possivelmente, aumente sete vezes até 2050 conforme demonstra a gráfico 15 a seguir:

Gráfico 15 - Volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida para os EUA até 2050



Fonte: IRENA, 2016.

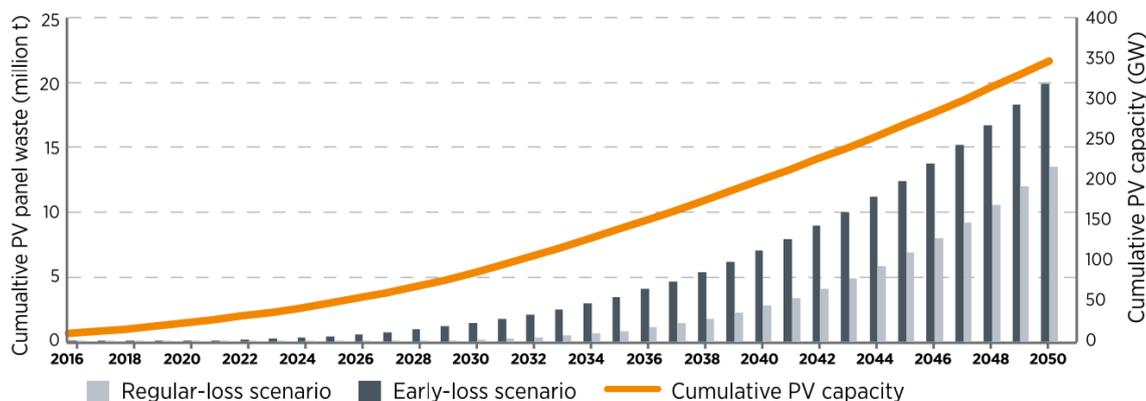
Contudo, sem regulamentos específicos, os painéis fotovoltaicos devem ser eliminados de acordo com a Lei de Recuperação e Conservação de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, de 1976) que é o quadro jurídico para gestão de resíduos sólidos perigosos e não perigosos.

Atualmente, o estado da Califórnia está em processo de desenvolvimento de um regulamento para a gestão de painéis fotovoltaicos em fim de vida dentro de suas fronteiras, várias etapas ainda devem ser cumpridas antes que este regulamento seja implementado.

f) China

Em 2015, a China instalou 15 GW de painéis fotovoltaicos, atingindo sua meta de 10 GW de crescimento médio anual e mantendo sua posição como o maior mercado fotovoltaico do mundo. Com isto, a quantidade de resíduos fotovoltaicos deve aumentar para 200.000 e 1,5 milhões de toneladas até 2030 e para 13,5-19,9 milhões toneladas até 2050 como demonstra a gráfico 16 a seguir, contudo, ainda sem uma legislação específica para questão do descarte:

Gráfico 16 – Projeção de volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida para a China até 2050



Fonte: IRENA, 2016.

Devido ao rápido desenvolvimento da indústria de painéis fotovoltaicos, a reciclagem está recebendo mais atenção do governo e produtores. Desta forma, estabeleceu-se o Programa Nacional de design de produto e de alta tecnologia, para

pesquisa e desenvolvimento do descarte e reciclagem dos painéis fotovoltaicos. O programa, no âmbito político, cria quadros financeiros necessários para o desenvolvimento da pesquisa, além do estabelecimento de metas para reciclagem, com atenção especial para melhoria dos processos de reciclagem no local da geração, através de uma planta de descarte para usinas fotovoltaicas (IRENA, 2016).

g) Índia

Desde 2012, a Índia apresenta-se como um mercado em crescimento, instalando mais de 1 GW de painéis fotovoltaicos anualmente, alcançando uma capacidade cumulativa de quase 5 GW em 2015. Isso coloca a Índia entre os dez principais mercados fotovoltaicos do mundo (IRENA, 2016b), contudo, ainda carece de regulamento específico para o setor em relação ao descarte e reciclagem.

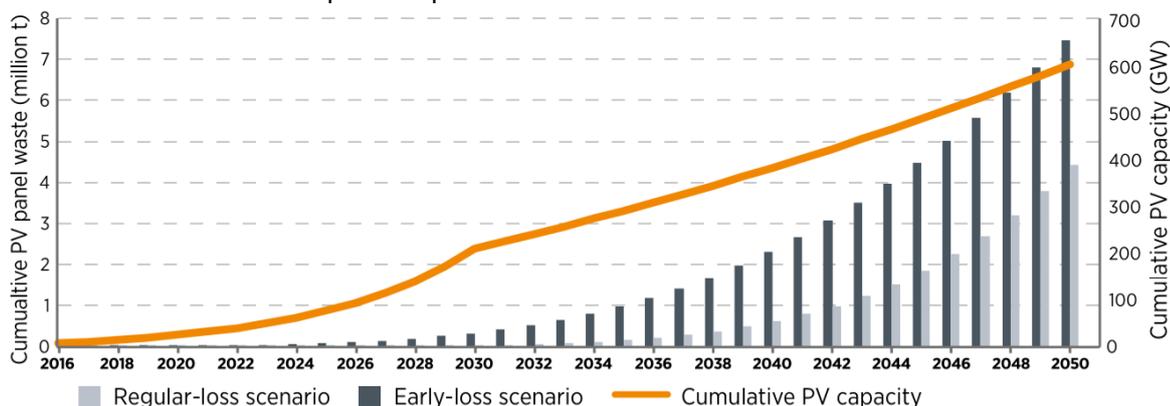
No entanto, o setor de energia indiano tem pela frente o enfrentamento de dois desafios principais:

- aliviar a pobreza energética, mais de um terço da população da Índia não tem acesso à eletricidade.
- atender ao aumento da demanda de eletricidade decorrente do rápido crescimento econômico, que tem previsão de aumento de cinco a seis vezes em meados do século (IEA, 2011).

Estes desafios representam uma oportunidade significativa para energia renovável, incluindo a fotovoltaica. Com isto, o governo indiano pretende instalar 100 GW de sistemas fotovoltaicos conectados à rede até 2022 (Jawaharlal Nehru National Solar Mission, 2011).

A implantação de painéis fotovoltaicos em grande escala ocorreu apenas recentemente, portanto, os grandes volumes de resíduos em fim de vida são esperados depois de 2030. A gráfico 17 mostra os volumes de resíduos de painéis PV de fim de vida esperados na Índia.

Gráfico 17 – Projeção de volumes de resíduos de painel fotovoltaico em fim de vida esperados para a Índia até 2050



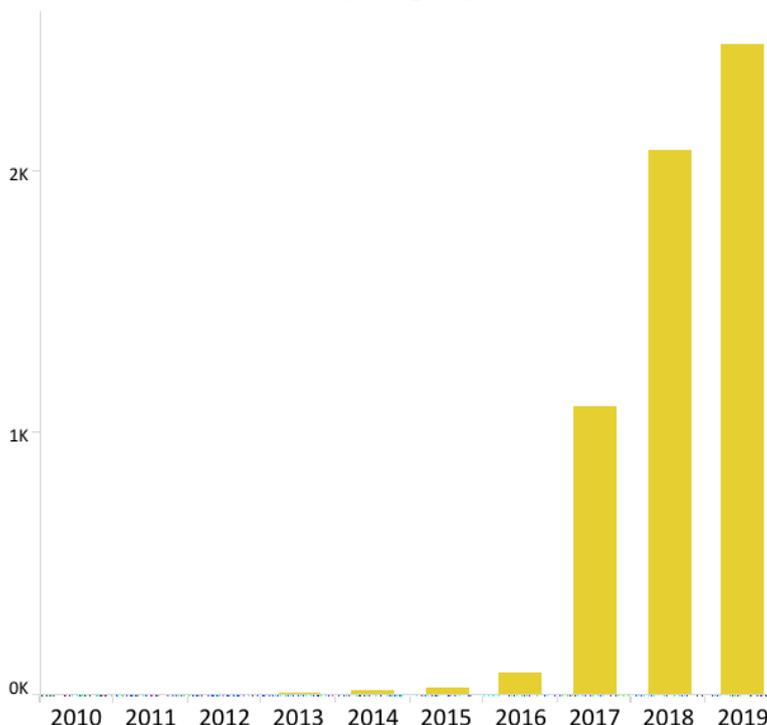
Fonte: IRENA, 2016.

No mais, a Índia não tem regulamentos que obriguem a cobrança, recuperação e reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim de vida. Isto significa que os resíduos de painéis fotovoltaicos gerados hoje são cobertos pelos regulamentos gerais de resíduos.

h) Brasil

Trata-se de um jovem mercado, com grande potencial geográfico e de radiação solar, que até o ano de 2019 não tinha uma produção nacional de painéis fotovoltaicos. De acordo com o gráfico 18 a seguir, o Brasil conta com a seguinte capacidade instalada para geração de energia elétrica fotovoltaica em todo seu território:

Gráfico 18 – Capacidade instalada para geração fotovoltaica no Brasil (MW)



Fonte: <https://www.irena.org/solar>, acesso em outubro de 2020.

Para o Brasil, relevante ressaltar o que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305, BRASIL, 2010), sobre o lixo eletrônico. Esta lei, quando trata dos resíduos eletrônicos define o compartilhamento da gestão dos resíduos entre o poder público, seus geradores (fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes) e consumidores finais. Desta forma, fica determinada a implementação obrigatória de um sistema de Logística Reversa pós-consumo sob a responsabilidade de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes dos resíduos eletroeletrônicos. Assim, a classificação dos painéis fotovoltaicos como resíduos eletrônicos já obrigaria os geradores a concretizar as soluções para o descarte.

Portanto, diante da definição encontrada, os equipamentos eletroeletrônicos são:

Partes e peças cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços” (ABNT, 2012).

Neste contexto, o edital de chamamento para a Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos em geral foi aprovado em 2012, porém, mais da metade das propostas apresentadas pelas entidades representativas foram desclassificadas por

não terem abrangência nacional e as negociações continuam ocorrendo (FECOMERCIO, 2014).

Algumas legislações estaduais avançaram na definição dos Resíduos Eletrônicos, porém, se desencontram ou estão ausente em outras, como é o caso dos resíduos fotovoltaicos. Portanto, enquanto as definições forem vagas e desalinhadas para uma logística reversa integrada, sem obrigações claras, a consolidação de Acordos Setoriais fotovoltaicos é improvável (Ushizima et. al., 2014).

Um exemplo de um acordo público setorial vem do estado de São Paulo, quando na Política Estadual de Resíduos Sólidos foi apresentado o conceito de Responsabilidade Pós-Consumo, que estabeleceu o seguinte:

“Os fabricantes, distribuidores ou importadores de produtos que, por suas características, venham a gerar resíduos sólidos de significativo impacto ambiental, mesmo após o consumo desses produtos, ficam responsáveis (...) pelo atendimento das exigências estabelecidas pelos órgãos ambientais e de saúde, especialmente para fins de eliminação, recolhimento, tratamento e disposição final desses resíduos, bem como para a mitigação dos efeitos nocivos que causem ao meio ambiente ou à saúde pública” (Ushizima et. al., 2014).

A partir do conceito transcrito acima resultou no Programa de telefonia móvel celular e de rádio de comunicação, assinado em junho de 2012. O resultado deste Termo de Compromisso foi que, os aparelhos de cinco empresas de telefonia, sob a responsabilidade do Sindicato Nacional das empresas de telefonia e de Serviço Móvel celular e pessoal (SINDITELEBRASIL), tiveram como meta disponibilizar postos de coleta em todas as lojas próprias e revendas autorizadas até o final do primeiro ano (Abinee, 2014).

Com as imensas reservas que existem, a logística reversa de aparelhos celulares, comparadas com painéis solares, quando o primeiro tem uma obsolescência rápida e pequeno volume, e o segundo tem uma perspectiva longa de vida útil, e grande volume, a comparação parte de um posto específico de análise. O ponto é a consolidação de um acordo setorial que responda a demanda de reciclagem e gestão dos resíduos solares.

4.13 Análise do ciclo de vida

A análise do ciclo de vida (ACV) representa uma ferramenta para analisar sistematicamente o desempenho ambiental de produtos ou processos ao longo de toda a sua vida, incluindo extração de matéria-prima, fabricação, uso, descarte e reciclagem. Por isso, a ACV é frequentemente considerada uma abordagem “do berço ao túmulo” para a avaliação dos impactos ambientais, no entanto, esta análise tem ressalvas imensas devido a exigência de se conhecer com clareza os processos industriais que envolvem a fabricação dos módulos fotovoltaicos.

Uma análise interessante que pode fornecer subsídios para os serviços ambientais diante do ciclo de vida é o cruzamento que se faz com o desenvolvimento de produtos. Alting (1995), propõe o design do ciclo de vida do produto através de escolhas sobre o conceito do produto, estrutura, materiais e processos. Diante da proposta do autor acima citado temos a tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Estratégias de design através do ciclo de vida

Estágio	Estratégia	Relevância
Pré-fabricação	Uso de materiais reciclados	depleção de recursos, cargas ambientais
	Uso de materiais menos intensivos em energia	cargas ambientais
	Seleção de componente consciente ambientalmente	cargas ambientais, desempenho do fornecedor
Fabricação	Uso de processo de alto rendimento	cargas ambientais, ambiente de trabalho
	Uso de processos com economia de material	depleção de recursos, cargas ambientais
	Redução de sobrecarga	cargas ambientais
Transporte e Distribuição	Logística aprimorada	cargas ambientais
	Baixo peso/volume	cargas ambientais
	Use material reciclado para embalagem	depleção de recursos, cargas ambientais
Usar	Baixo consumo de energia	depleção de recursos, cargas ambientais
	Design para manutenção/vida longa	depleção de recursos
Disposição	Design para desmontagem	depleção de recursos
	Preservação da qualidade dos materiais	depleção de recursos, cargas ambientais

Fonte: Alting, 1995.

A avaliação do impacto ambiental das decisões de design e fabricação não é novidade. Os pesquisadores não se concentraram apenas na minimização de resíduos industriais e na substituição química em processos ou produtos, mas também no efeito das decisões de design do produto no meio ambiente durante os estágios de fabricação, uso e final de vida do produto (Zhu; Deshmukh, 2003).

Portanto, um aspecto relacionado a projeção dos resíduos solares liga-se ao seu aspecto de design. Pouco o produtor é incentivado para repensar o design dos painéis solares para reduzir ou eliminar o uso de plásticos não recicláveis, ou para prolongar a vida útil dos produtos, projetando para reparabilidade. Essas soluções tornam invisível o ecossistema mais amplo de reparo e manutenção, em que o reaproveitamento produtivo e a reutilização são uma parte importante dos meios de subsistência (Cross J., Murray D., 2018; Magalini, F. et. al., 2016).

Assim, a variação frequente das especificações do produto faz com que a montagem e desmontagem de componentes e módulos se tornem cada vez mais complicadas (Tseng et al, 2008). Como resultado, a questão do design modular do produto pode ser responsável pelo nível de complexidade que enfrentará os recicladores. O estabelecimento de padronizações deve contribuir, não apenas para o setor de reciclagem, mas também para o mercado de módulos usados, reparos e reposição de componentes do sistema.

Ou seja, os painéis não são projetados para serem desfeitos, o que contribui para os custos e complexidade associados à reciclagem. Desta forma, é evidente a necessidade de se investir em pesquisa sobre design para desmontagem. Assim, mais uma vez, com um design favorável ao desmonte, contribuiria para a reciclagem do módulo, como também contribuiria para o mercado de reparo e reutilização dos componentes dos painéis fotovoltaicos (Mathur, D. et. al., 2020).

Sheila Davis, diretora do Coalizão de Tóxicos do Vale do Silício, em um workshop sobre resíduos solares no Strathmore Energy Research Center, em Nairobi, em 2015, dizia: Se a tecnologia microeletrônica não pode ser reciclada ou reparada, ela foi projetada para o despejo (Cross, J.; Murray, D., 2018).

Desde o início da indústria, historicamente investiu-se em pesquisa tecnológica para aumentar eficiências dos materiais. No entanto, tradicionalmente os produtores se concentraram mais na produção do que no fim de vida (reparo, tratamento e reciclagem). Esta lógica também se aplica para a indústria de energia renovável, que apresenta crescimento significativo recentemente. O aumento dos volumes de resíduos fotovoltaicos irá mudar esta perspectiva e deve influenciar todo o ciclo de vida de um painel (IRENA, 2016).

Assim, os diferentes estágios do ciclo de vida têm que ser levados em consideração. A concentração da análise em apenas determinados estágios pode levar, por exemplo, ao descarte infundado, desfalcando as possibilidades de reciclagem.

Para a análise do ciclo de vida dos painéis solares devemos lembrar dois tipos de fim de vida para os equipamentos:

- Perda regular: considera uma vida útil de 30 anos;
- Perda precoce: considera falhas ou desgaste antes da vida útil de 30 anos

Para o cenário de perda precoce, segundo a literatura (IEA-PVPS, 2014a; Padlewski, 2014; Vodermyer, 2013 e DeGraaff, 2011), temos a seguinte estatística de perda dos painéis fotovoltaicos instalados (MW):

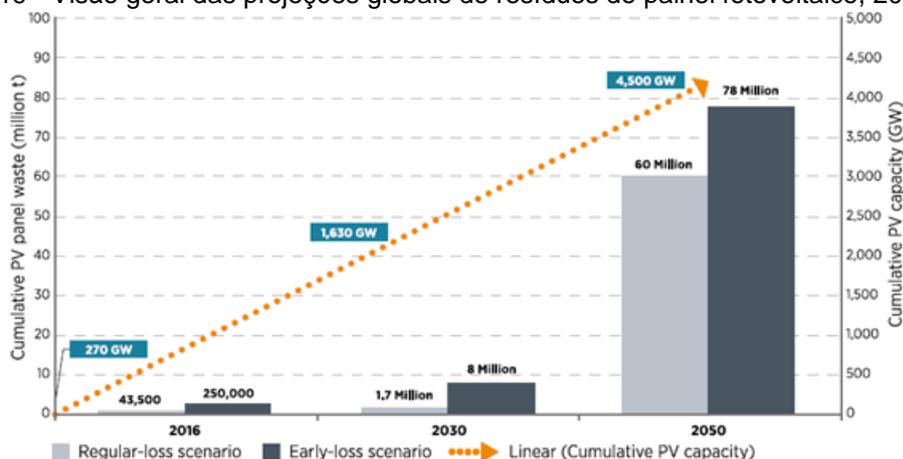
- 0,5% devido a danos durante as fases de transporte e instalação;
- 0,5%, em dois anos, devido a instalação ruim;
- 2% se tornarão resíduos após dez anos;
- 4% se tornará resíduo após 15 anos devido a falhas técnicas.

Ou seja, tem-se pelo menos 7% de perda precoce, além de cerca de 40% das falhas no painel fotovoltaico que derivam de rachaduras e falhas microscópicas. Esta razão, de falhas microscópicas, têm sido a mais comum em painéis mais novos, fabricados após 2008, quando teve início a produção de painéis com células mais finas (IRENA, 2016; Komoto, 2018).

Outro aspecto que elucida para o número de perdas precoce em painéis fotovoltaicos forma-se devido aos prazos de subsídio estabelecidos pelo governo chinês. O curto prazo fez com que, a maioria dos projetos fotovoltaicos fosse realizada com pressa, comprometendo a qualidade. Logo, alguns equipamentos acabam sendo inferiores. Com isto, em um futuro próximo, aumentará a demanda por reparo para componentes fotovoltaicos (Yan Li, et. al., 2019).

O gráfico 19, a seguir, faz a projeção das perdas regulares e precoce dos painéis solares.

Gráfico 19 - Visão geral das projeções globais de resíduos do painel fotovoltaico, 2016-2050



Fonte: IRENA, 2016.

Para a projeção dispostas no gráfico 19, logo acima, temos uma perspectiva, para o ano de 2050, de 60 milhões de toneladas para uma capacidade de geração fotovoltaica acumulada de 3 mil GW; como igualmente, para uma perde precoce, teríamos um volume de 78 milhões de toneladas, para uma capacidade de geração fotovoltaica acumulada de 3,9 mil GW. Contudo, um problema dos cenários de projeção propostos sobre as perdas dos painéis solares consiste em desconsiderar o aumento da eficiência da tecnologia, o que reduziria o volume, já que um volume menor de placas seria capaz de gerar a mesma quantidade de energia.

Também, indispensável considerar que os dados sobre as perdas dos painéis fotovoltaicos representam uma pequena fração do total de painéis instalados no mundo todo. Isso significa que as premissas estatísticas carregam algumas incertezas e precisam ser refinados conforme mais dados se tornam disponíveis. Além do mais, a rápida evolução de materiais e projetos fotovoltaicos adiciona outro nível de complexidade e incerteza das estimativas, ainda mais, algumas falhas podem não ser detectadas imediatamente ou podem ser toleradas por anos (IRENA, 2019).

De qualquer forma, a maioria dos resíduos é normalmente gerada durante quatro fases primárias do ciclo de vida de qualquer painel fotovoltaico, estas fases são:

- 1) produção de painel;
- 2) transporte de painel;
- 3) instalação e uso do painel;
- 4) eliminação do fim da vida útil do painel.

Das fases citadas, apenas na produção não ocorre a preocupação com a geração de resíduos, visto que os resíduos da produção seguem o gerenciamento coordenado pela própria indústria (IRENA, 2016).

4.14 Nexos água-energia

A palavra "nexo" refere-se a uma conexão ou série de conexões ligando duas ou mais coisas, portanto, enfatiza interligações entre o meio ambiente (natural, recursos e ecossistemas) e desenvolvimento humano (alimentos, energia e segurança hídrica), e a necessidade de coordenação, gestão integrada e governança em todos os setores (Pandey, V. P.; Shrestha, S., 2017).

Existe uma possibilidade que o crescimento econômico, em breve, será restringido pela escassez de um ou mais desses recursos. Com isto, segurança hídrica, segurança energética e segurança alimentar já estão nas agendas nacionais e internacionais. Estes recursos, água, energia e alimentos, apresentam fortes interdependências. Isso nos permite levar em consideração os impactos da decisão de um setor sobre si mesmo como nos outros setores. A implementação prática do conceito do nexo é complexa devido à vastidão da individualização dos setores, isto porque, o nexo, exige que as partes interessadas de todos os setores e em todos os níveis, estejam envolvidas, superando a individualização (Salam, P. et. al., 2017).

Desta forma, assumindo que as principais decisões em relação à comida, água e energia são políticas, e ocorrem dentro de arenas de relações de poder desiguais, evidencia-se a carecerem de equalizadores democráticos, como transparência e participação pública (Vogt et al., 2010; Middleton et al., 2015). Para melhor compreensão deste aspecto, das relações de poder, pode-se pensar localmente, como forma de contribuir com a reflexão sobre os aspectos políticos que envolvem o nexo, no seguinte caso: a quem estaria prioritariamente posto os serviços de água, a uma comunidade de agricultores familiares, ou a uma indústria sediada com subsídios governamentais? Sem equalizadores democráticos, o acesso a água, estaria refém dos interesses do capital em detrimento da dignidade humana.

Nisto, uma abordagem de nexo orienta-se em três princípios (Bonn2011 Conference, 2011):

1. Colocar as pessoas e seus direitos humanos básicos como fundamento do nexo;
2. Criar consciência pública e vontade política para implementação bem sucedida;
3. Envolvimento das comunidades locais no planejamento e processos de implementação, a fim de criar uma sensação de participação e propriedade.

Um exemplo dos conflitos que podem se instalar pelas disputas individualizadas dos setores reside na implantação das energias renováveis e suas necessidades. As energias renováveis podem ser favoráveis ao combate das mudanças climáticas, no entanto, podem não ser favoráveis considerando-se as necessidades de água e terra, ou seja, por exemplo, a proliferação dos biocombustíveis, fonte renovável, no setor de transporte, por meio de subsídios, tem levado a maiores competições pelo uso da terra e da água (ADB, 2013).

Com isto, tem-se que o nexo também se orienta por uma lógica de negócios. Dentro desta lógica, os governos são incentivados a buscar o uso da água no setor de maior valor, afetando à distribuição de água entre os diversos setores. Essa orientação significa, por exemplo, maior dependência de uma agricultura eficiente no

uso da água, para a importação de alimentos. Portanto, para responder aos fluxos de comércio na agricultura, os países precisam analisar a importação de água contida na produção, os fluxos de água virtuais (Fórum Econômico Mundial, 2011).

Portanto, a linguagem do nexu procura enquadrar os debates em torno das pressões sobre os recursos naturais, pressões geradas pela combinação de fatores, incluindo mudanças climáticas, demografia, e aumento dos níveis de consumo.

Mais uma vez, sobre a perspectiva de negócios, crises alimentares e energéticas, e suas relações com a segurança hídrica, são analisadas diante do valor de mercado, que pode se mostrar inadequado. O que se coloca é, diante desta lógica, uma reação ágil do mercado permitiria um ajuste à escassez de recursos. Da perspectiva de uma política pública, essas crises de escassez revelam os limites das abordagens institucionais e sua competência para gerenciar seus recursos, já que comumente utilizam compartimentação em silos individuais para sua interpretação e gerenciamento (Pandey, V. P.; Shrestha, S., 2017). Neste contexto, a escassez hídrica, que no caso do Brasil, com forte geração elétrica de origem hídrica, aumenta a conta de energia com a ativação das usinas termoeletricas, afetando o preço de diversos produtos, inclusive os alimentares. Isto teria repercussões sociais. Daí a necessidade de agilidade nas tomadas de decisões, as quais os autores Pandey, V. P.; Shrestha, S., 2017, atribuem ao mercado. Novamente, por motivos expostos em parágrafo anterior, quando se atribuía a importância de equalizadores democráticos, não se tem na agilidade do mercado a forma mais ética e humanitária de agir.

Notadamente, o conceito de nexu apresenta uma lacuna. Em geral, o nexu desconsidera as questões ambientais e perde a oportunidade para apoiar a construção de um Antropoceno sustentável, ao invés disso busca pela simples proteção do que resta da natureza (Muller, Mike, 2017). Diante disto, mais uma vez, como colocado ao longo deste texto, cabe indagar, sendo a geração fotovoltaica uma fonte renovável igualmente se constitui uma fonte ambientalmente adequada?

Neste contexto, nas lacunas presentes, temos, na capacidade de interpretação sinérgica do nexu, o potencial para compreensão do descarte das células fotovoltaicas e a sequente formulação de políticas para o enfrentamento desta questão.

5) Metodologia

5.1 Área de estudo

A posição geográfica do Brasil propicia índices elevados de radiação solar em quase todo o território nacional, inclusive durante o inverno, superiores aos observados em muitos países líderes em aproveitamento fotovoltaico. Na verdade, considerando que a faixa de variação da irradiação global horizontal anual do Brasil seja de 1.500 a 2.200 kWh/m², como se vê na figura 5, praticamente todo território brasileiro é elegível à expansão do aproveitamento deste recurso (EPE, 2018). Ou seja, mais precisamente, delimitando-se exclusivamente às áreas *on-shore*, com maior nível de irradiação, o potencial de geração centralizada é de 506 TWh/ano; já para a geração distribuída o potencial é de 287 TWh/ano; e das áreas *offshore*, o potencial é de 94.706 TWh/ano (EPE, 2018).

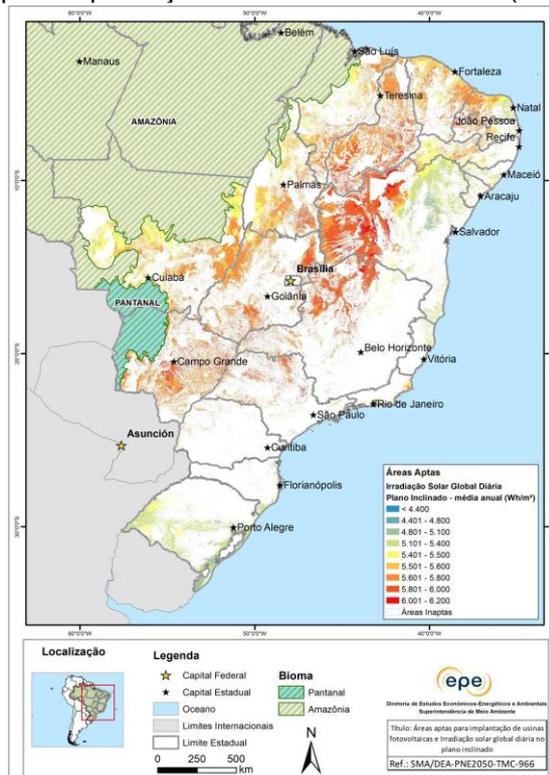
Figura 5– Mapa da média anual diária da irradiação solar global no plano inclinado



Fonte: EPE, 2018.

A seguir tem-se a figura 6 que aponta áreas aptas à implantação de projetos fotovoltaicos de geração centralizada. Para elaboração desta projeção levou-se em consideração: as áreas com declividade inferior a 3% e com dimensões superiores a 0,5 km². Além do mais foram excluídas áreas como: unidades de conservação, as terras indígenas, as comunidades quilombolas, Mata Atlântica com vegetação nativa, áreas urbanas e a hidrografia (EPE, 2018).

Figura 6 - Áreas aptas para implantação de centrais fotovoltaicas (fazendas solares) no Brasil



Fonte: EPE, 2018.

Já no Ceará, a primeira vez que a energia solar esteve a serviço do capital foi na produção de carne, quando se secava a carne ao sol. Logo, as mantas de carne eram salgadas e estavam prontas para o transporte para outras províncias do Império, através de um processo eficiente de conservação da carne, que alimentava a indústria local e o comércio interprovincial, (Abreu, 1998; Girão, 1984). Contudo, comercialmente, o sol serviu mais ao turismo do que a geração de energia. Até que, em 2011, foi inaugurada a primeira usina solar cearense no sertão central, no município de Tauá.

Em 2016, foi implantada a resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA), nº 3/2016, que isenta de licenciamento ambiental as instalações fotovoltaicas de até 2MW de potência, instalados em telhados e fachadas.

Logo, em 2018, o licenciamento ambiental para empreendimentos de geração solar foi simplificado pela resolução do COEMA nº06/2018. Neste mesmo ano, o Comitê de Energia de Fortaleza já discutia Rotas Estratégicas. Estas rotas têm o objetivo de traçar os caminhos para atrair, reter e desenvolver pessoas, empresas e investimentos focados na inovação e na sustentabilidade de importantes setores para a economia do estado do Ceará. Como resultado deste comitê ocorreu o 27º Leilão de Energia Nova (A-4), realizado na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), pelo Governo Federal, no dia 4 de abril de 2018, com a contratação de 14 usinas solares para serem entregues em quatro anos, totalizando investimentos da ordem de R\$ 2,1 bilhões, o que correspondeu a cerca de 40% do valor total contratado neste leilão (Schubert, 2019).

Além do mais, o Atlas eólico e solar do Ceará (2019), destaca o potencial solar integrado das áreas degradadas, para estudos de viabilidade de implantação de grandes projetos. Estima-se um potencial solar de aproximadamente 190 GWp nessas áreas, com capacidade de geração de cerca de 304 TWh/ano, equivalente a quase a metade da oferta de energia elétrica em todo o país no ano de 2018. Desta forma, para fins comparativos, o desenvolvimento de 10% do potencial nas áreas degradadas (19 GWp), ocupando apenas 1 200 km², equivalente a 0,8% da área territorial do Ceará, poderia gerar o equivalente à soma da geração elétrica nacional a partir das fontes nuclear (15 674 GWh) e carvão (14 204 GWh) no ano de 2018 (EPE, 2019).

Contudo, deve-se lembrar a importância dos serviços ambientais prestados pelos ecossistemas preservados e da importância de recupera-los. Desta forma, sem observar a perpetuação dos impactos ambientais, e os desserviços, a energia fotovoltaica descumpra seu papel de sustentável.

5.2 Os equipamentos fotovoltaicos

Atualmente, a partir das tecnologias disponíveis, temos a seguinte composição das partes dos módulos ou placas fotovoltaicas, conforme a figura 7:

Figura 7 – Composição dos painéis solares



Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>, acesso em 12/08/2020.

Dos elementos da figura 7 acima, cabe uma breve descrição que posteriormente conduzirá sobre as possibilidades de destinação dos materiais em fim de vida. Portanto, temos (<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passa-da-fabricacao-do-painel-solar.html>, acesso em 12/08/2020; Yan Xu, 2018; Cheng and Wang, 2007; Miles et. al., 2005):

- Molduras de alumínio anodizado (Frame do Painel Solar)

Desenvolvida para adicionar robustez ao painel solar e garantir a sua integridade nas mais adversas situações, assegurando que não ocorra trinca nas células, como também garante maior durabilidade ao painel. A moldura representa aproximadamente 8% do custo do painel e peso aproximado de 12,7%.

- Vidro especial

Considerado ultrapuro e com baixo teor de ferro, este vidro foi desenvolvido especialmente para permitir o máximo de passagem dos raios solares. Trata-se de um vidro temperado de 3.2mm ou 4mm, revestido com uma substância antirreflexiva. Este vidro representa aproximadamente 10% do custo de fabricação do painel solar e peso aproximado de 54,7%.

- Película encapsulante

Tradicionalmente conhecido como EVA, acetato-vinilo de etileno (*Ethylene Vinyl Acetat*), é um material selante de cura rápida especificamente projetado para os painéis fotovoltaicos. Ele protege as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade, assegurando que o máximo luz visível atinja as células solares. O EVA representa aproximadamente 8% do custo de fabricação do painel solar e peso aproximado de 10%.

- Células fotovoltaicas

O painel solar foi criado para proteger as células fotovoltaicas, que são confeccionadas a partir de uma 'fatia' de cristal de silício ultrapuro, e tem a função de gerar energia através de uma reação físico-química. Estas componentes, as células fotovoltaicas, são muito finas, com aproximadamente 185 microns de espessura

(menos de 2mm) e representam aproximadamente 60% do custo de um painel solar e peso aproximado de 3,6%.

– Backsheet

Trata-se de um filme branco que tem a função principal de proteger os componentes internos do painel solar, especificamente as células fotovoltaicas, também agindo como isolante elétrico. O *backsheet* tem uma composição robusta de 3 camadas. Possui a aparência de um "filme branco plástico grosso" e representa aproximadamente 8% do custo de fabricação do painel solar e peso aproximado de 3,1%.

– Caixa de junção

Constitui um gabinete que fica na parte traseira do painel solar com a função de interconectar as placas fotovoltaicas eletricamente por meio de cabos e conectores especiais. Estes conectores são comumente utilizados os tipos MC4 ou MC3. A caixa de junção é adesivada com silicone ou uma fita dupla-face especial, e possui diodos de by-pass que vão garantir a segurança e o bom funcionamento do painel solar. A caixa de junção representa aproximadamente 6% do custo de fabricação do painel solar e peso aproximado de 15.9%.

Diante das informações apresentadas acima, das componentes, temos a tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Resumo sobre os componentes dos módulos

Componente	Custo aproximado	Peso aproximado
Molduras de alumínio (frame)	8%	12,7%.
Vidro especial	10%	54,7%
Película encapsulante	8%	10%
Células fotovoltaicas	60%	3,6%
Backsheet (fundo protetor)	8%	3,1%
Caixa de junção	6%	15.9%

Em 2015, dois terços dos painéis fotovoltaicos instalados em todo o mundo eram painéis Silício (c-Si). Normalmente, mais de 90% de sua massa é composta de vidro, polímero e alumínio, que pode ser classificado como não perigoso. No entanto, outros componentes dos painéis de c-Si podem apresentar dificuldades de reciclagem por conterem silício, prata e vestígios de elementos como estanho e chumbo (juntos representam cerca de 4% da massa). Já os painéis de filme fino (9% da produção anual global) consistem em mais de 98% de vidro, polímero e alumínio (resíduos não perigosos), com quantidades modestas de cobre e zinco (somam em torno de 2% da massa), que constituem resíduos potencialmente perigosos para o ambiente. Além dos mais, os painéis de filme fino, também contêm semicondutores ou materiais perigosos, como índio, gálio, selênio, cádmio telúrio e chumbo (IRENA, 2016). Materiais perigosos precisam de tratamento adequado e carecem de uma classificação de resíduos específica.

Necessário esclarecer que, para a eficiência dos painéis solares, deve-se correlacionar com a pureza do Silício (Si). Contudo, os processos utilizados para melhorar a pureza do silício são caros e impactam diretamente no preço do painel

solar. (<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>, acesso em 12/08/2020).

A tabela 4 a seguir resume as informações dos principais tipos de módulos fotovoltaicos comercializados.

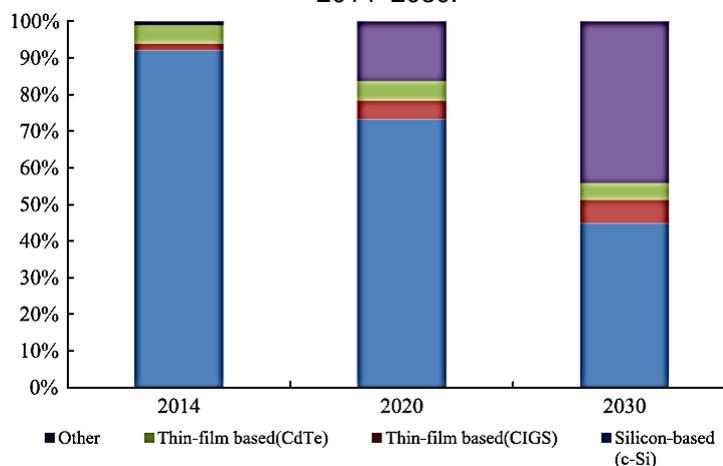
Tabela 4 – Relação dos tipos de painéis solares, potência e valor comercial médio

	Tecnologia	Potência	Valor médio	Eficiência média	Vida útil (anos)	Garantia do fabricante
1	Painel solar monocristalino CS6K	275 W	R\$ 457,00	15 - 22%	+ de 30	25 anos
2	Painel solar Canadian policristalino 144 Half Cel	360 W	R\$ 860,00	14 - 20%	+ de 30	25 anos
3	Painel solar filme fino	100 W	R\$ 889,00	7 - 16%		
4	Painel solar de silício amorfo (a-Si)	3 W	R\$ 63,00	6 - 9%		
5	Painel solar de telureto de cádmio (CdTe)	85 W	R\$ 470,00	9 - 16%		
6	Painel solar de seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS)	1,25 W	R\$ 133,90	10 - 13%		
7	Célula fotovoltaica orgânica (OPV)	3 W	R\$ 46,00			
8	Painel solar híbrido - HJT	405 W	R\$ 715,00	21% - 24%		

Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>, acesso em 12/08/2020, adaptado; VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. 2012.

O gráfico 20 a seguir mostra a participação no mercado dos painéis solares por grupo de tecnologia.

Gráfico 20 - Participação no mercado dos painéis solares por grupo de tecnologia, 2014–2030.



Fonte: Weckend et al. 2016.

A partir do gráfico 20 acima pode-se concluir que, entre os painéis fotovoltaicos descartados, os mais importantes para reciclar nos próximos anos serão, por ordem: painéis à base de silício (C-Si), CIGS, CdTe e outros tipos. Sendo que, atualmente, mais de 90% do mercado fotovoltaico mundial é coberto por células de silício cristalino (mono e poli) (EPE, 2018).

Ainda em 2012, os painéis de silício cristalino respondiam por cerca de 90-95% do mercado fotovoltaico global, enquanto os painéis solares de terceira geração ainda não eram comercializados em larga escala (Yan Xu et. al. 2018; Villalva, M. G.; Gazoli, J. R. 2012).

5.3 Os materiais e a possibilidade de reciclagem

Com maior participação no mercado, os painéis c-Si, apresentam os seguintes materiais com potencial de recuperação: vidro, polímero, silício, alumínio, prata e outros. Já os painéis CIGS apresentam: vidro, polímero, alumínio, cádmio, gálio, índio, selênio e outros. Os painéis de CdTe possuem: vidro, polímero, telureto de cádmio, níquel e outros. Sobre a constituição destes materiais, que são incorporados nas diferentes tecnologias de construção dos módulos fotovoltaicos, temos:

- Índio: a incorporação de novas camadas de óxido de estanho, material condutor mais abundante, portanto, mais barato, dopado com flúor, podem substituir óxido de índio-estanho como eletrodos frontais. Isso reduz o uso de índio em óxido em alguns painéis fotovoltaicos de filme fino, tecnologias como óxido condutor transparente (Calnan, 2014).
- Vidro: espera-se uma otimização da espessura do vidro, com revestimento antirreflexo mais eficientes e estruturas superficiais que irão aumentar a transmissão dos vidros frontais em mais 2% até 2024. O uso de vidro de dois milímetros de espessura, ou menos, em um único laminado de painel exigirá mecânica adicional para estabilização esforço, que pode ser alcançado por painéis de vidro duplo com um encapsulamento de camada mais fina. Estas configurações podem levar a reduções significativas de materiais, substituindo a necessidade de uma folha traseira (Raithel, 2014).
- Polímeros: Encapsulantes e folhas traseiras não são reciclados hoje porque os materiais duroplásticos, que dominam o mercado, não podem ser dissolvidos ou derretido para reciclagem sem decomposição. Pesquisas estão procurando reduzir ou substituir a quantidade de polímeros, especialmente para folhas traseiras, utilizando uma folha de tereftalato de polietileno. As folhas de tereftalato contêm algumas centenas de partes por milhão de antimônio, usado como catalisador de polimerização (Ramaswami, 2014). No entanto, o plástico misto é difícil de reciclar, embora possa ser usado para produção de energia por incineração (Yan Xu et. al., 2018). Desta forma, a incineração surge como uma alternativa (Aryan et al., 2018 e Corcelli et al., 2018). No entanto, devido ao alto teor de halogênio, a incineração exige que seja realizada em uma instalação de resíduos perigosos, para minimizar a emissão de poluentes atmosféricos potencialmente tóxicos, como o hidrogênio fluoreto (Wambach, 2017).

- Silício: Células mais finas podem reduzir a quantidade de silício usado em painéis c-Si. Com esta redução no projeto de painéis com contato traseiro, o uso de silício poderia ser cortado pela metade, e o consumo de energia pode ser reduzido em cerca de 30% (Raithel, 2014).
- Prata: Cerca de 95% dos painéis de c-Si são produzidos com linhas de contato prateadas, cobrindo cerca de 6% - 8% da área da célula. Devido a tecnologia de impressão a jato de tinta ocorreu uma redução significativa de prata nos módulos. A tecnologia de impressão permite o uso de outros metais, além da prata, como cobre, em combinação com níquel e alumínio. O uso de contato traseiro, ou células bifaciais, podem ajudar a reduzir ainda mais o consumo de prata por watt (W), aumentando a eficiência do painel fotovoltaico (Perez-Santalla, 2013). Neste contexto, por exemplo, o projeto de pesquisa liderado por CU-PV desenvolve novos métodos de metalização adequados para *wafers* mais finos. Este projeto baseia-se em camadas jateadas, posteriormente banhadas com níquel e cobre, resultando em uma redução de pelo menos 99% na prata (IRENA, 2016). Contudo, experimentos já demonstram grande recuperação de prata através da reciclagem. Uma rota de reciclagem demonstrou a possibilidade de recuperar até 99,98% da prata nas células fotovoltaicas pela combinação de processos envolvendo lixiviação por ácido nítrico seguida de processo de eletroprecipitação (Oliveira, L.S.S., 2019).

Do ponto de vista de valor, o componente mais caro por unidade de massa de um painel c-Si é a prata, seguido por cobre, silício, alumínio, vidro e polímero. A indústria fotovoltaica consome cerca de 3,5% - 15% da produção global de prata. Em média, um painel c-Si típico contém cerca de 6 a 10 gramas de prata (Berry, 2014 e Marini et al., 2014).

Mesmo havendo uma economia de prata na produção, devido a novas técnicas de impressão, gerando uma redução no consumo de prata por watt, o aumento da produção de painéis fotovoltaicos deve manter o consumo total (Silver Institute, 2014).

Novamente, descumpra qualquer função ambiental tornar a geração energética mais eficiente se continuarmos, desenfreadamente, progredindo o consumo de recursos.

Sobre o silício, que é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, significando não haver restrições quanto à matéria prima na produção dos painéis, a capacidade industrial de produção de módulos sempre se mostrou superior às vendas, demonstrando historicamente uma habilidade de aumentar a produção rapidamente para atender a demanda. Com isto, também não constitui uma restrição para o desenvolvimento fotovoltaico (EPIA, 2013). Contudo a preocupação com os materiais mais raros é uma realidade que inflexiona o otimismo demonstrado na capacidade industrial.

De qualquer forma, pode-se observar que o alumínio e o vidro são responsáveis por uma grande proporção de painéis fotovoltaicos, indicando que a perda de recursos potencialmente reutilizáveis pode ocorrer em qualquer tipo de painel fotovoltaico. Já a perda de metais raros, em particular índio, gálio e germânio constitui outro efeito da não reciclagem de painéis fotovoltaicos. Embora esses metais raros representem apenas 1% do volume do painel fotovoltaico, seu valor é significativo (Yan Xu et. al., 2018).

Portanto, a progressão da energia fotovoltaica, e seus aspectos relacionados à sustentabilidade, dependem indubitavelmente do desenvolvimento da eficiência e de tecnologias de reciclagem atreladas ao consumo dos recursos naturais, como também dos impactos causados pelo descarte.

Contudo, sobre os recursos minerais, o Brasil possui importantes reservas de quartzo, mineral onde o silício é encontrado, entretanto, este mineral é exportado em grau metalúrgico, ou seja, com menor índice de pureza, diferente do silício de grau solar, que exige maiores índices de pureza. O silício grau solar vale cerca de 10 vezes o preço do silício grau metalúrgico (CARVALHO et al., 2014). Atualmente, a purificação do silício é realizada fora do país, havendo parque industrial no Brasil apenas para realizar a montagem dos módulos (EPE, 2018).

5.4A reciclagem

Considerando a grande participação dos painéis a base de silício no mercado, que corresponderão, aliados aos valores atuais, a imensa parcela dos módulos passíveis de reciclagem nos próximos 30 anos, temos à disposição diversos processos de reciclagem dos materiais fotovoltaicos. Pesquisas têm se proliferado com a proximidade do fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos. Neste sentido dois grandes processos têm destaque: a linha de base e o Processo de Reciclagem Fotovoltaica de Alta Eficiência (PRFAE). A seguir a tabela 5 compara os dois processos.

Tabela 5 - Resumo das principais características da reciclagem Linha de Base e PRFAE

Material	Taxa de reciclagem		Detalhe de saída de material		Substituição do material	
	Linha de base	PRFAE	Linha de base	PRFAE	Linha de base	PRFAE
Alumínio	92%	94%	desmontagem manual	desmontagem automatizada	equivalente ao alumínio primário	equivalente ao alumínio primário
Cobre	72%	90%	cabos de cobre	além dos cabos partes internas do painel	equivalente ao cobre primário	equivalente ao cobre primário
Vidro	9%	88%	Restos de vidro	Processo de separação mantém alta pureza	baixo e média qualidade	média e alta qualidade
Silício	-	95%	-	O silício separado por lixiviação ácida para obter alta	-	Silício de grau metalúrgico
Prata	-	94%	-	Prata separada por eletrólise em hastes de grafite	-	equivalente a prata primária

Fonte: Ardente et. al., 2019 (adaptado).

O PRFAE é, de fato, um processo mais complexo e que consome muita energia. Contudo, apresenta maior recuperação de materiais com alta pureza e energia com maiores benefícios diante dos impactos do processo (Ardente et. al., 2019).

Neste processo, PRFAE, o transporte é um dos principais responsáveis pelos impactos da reciclagem fotovoltaica, devido a heterogeneidade da distribuição dos sistemas fotovoltaicos, principalmente quando da dispersão geográfica dos sistemas fotovoltaicos residenciais. Com isto, a distância para as instalações de reciclagem deve ser inferior a 100 km (Latunussa et al., 2016; Lunardi et al., 2018). Portanto, descentralizar as fases iniciais, com a criação de plantas locais para o pré-tratamento de resíduos fotovoltaicos mostra-se imprescindível (Ardente et. al., 2019). Contudo, não se pode esquecer que, diversos dos componentes dos sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica já fazem parte do cotidiano dos materiais eletrônicos, como cabos, por exemplo. Desta forma, uma falha na coleta destes materiais, desnudos de novidade, para o gerenciamento dos resíduos eletrônicos, já denuncia a

inexpressividade dos órgãos responsáveis pela defesa ambiental, visto que, se a gestão dos resíduos eletrônicos fosse uma realidade para o cotidiano brasileiro, semelhante a experiência japonesa, teríamos um quadro de incorporação adaptativa com o avanço do fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos, quando avançaríamos sobre os novos equipamentos da gestão de resíduos eletro eletrônicos. Portanto, torna-se urgente uma legislação preventiva que evite o desperdício da não reciclagem e o descarte inadequado.

Assim, o desmonte inicial dos painéis fotovoltaicos, ocorrendo em pontos de coleta, o que envolveria inicialmente a remoção da moldura de alumínio e o vidro, que poderiam ser vendidos separadamente, ter-se-ia a vantagem de reduzir a massa. Com isto, os elementos restantes do painel, que agora ocupam menor espaço e tem menor massa, poderiam ser enviados para recicladores para processamento posterior localizados em maiores distâncias (Mathur, D. et. al., 2020).

Desta forma, o pré-local de tratamento permitiria redução na massa de resíduos, persistindo os materiais que exigem plantas de reciclagem mais complexas. Este modelo permitiria dilatar a distância entre o pré-tratamento e as instalações finais entre 300 km a 500 km (Ardente et. al., 2019).

Agora, dentro dos processos de reciclagem de painéis solares de silício, a tabela 6 a seguir resume as principais tecnologias e processos relacionados, apresentando suas vantagens e desvantagens.

Tabela 6 - Processos de reciclagem de painéis solares de silício

Tecnologia	Processo	Vantagens	Desvantagens
Delaminação	Desintegração física	Tratamento eficiente de resíduos	Outros materiais se misturam com EVA. Danos nas células solares. Decomposição do aparelho
	Dissolução Química	Remoção da camada orgânica do vidro. Reutilização de resíduos químicos. Remoção simples do EVA	O tempo necessário para a delaminação depende da área. Equipamento caro. Perigoso para a saúde humana
	Dissolução em ácido nítrico	Remoção completa do EVA e da camada de metal do wafer. Possível recuperação de toda a célula	Emissões perigosas. Defeitos nas células devido ao ácido inorgânico
	Tratamento termal	EVA totalmente eliminado. Ao reutilizar wafers, é possível recuperar células inteiras	Envolve alto consumo de energia. Emissões perigosas
	Irradiação ultrassônica	Usado como um processo complementar para acelerar processo de dissolução. Remoção simplificada de EVA.	Processo muito caro. Tratamento de solução residual.
Material Separação	Processo mecânico seco e úmido	Processo não químico. Processo simples. Requer baixa energia. Equipamentos disponíveis.	Sem remoção de sólidos dissolvidos
	Gravura	Processo simples e eficaz. Recuperação de materiais de alta pureza	Alta demanda de energia devido as altas temperaturas. Uso de produtos químicos.

Fonte: Chowdhury, 2020 (adaptado).

Embora existam pesquisas laboratoriais em andamento, atualmente, estão disponíveis apenas dois tratamentos comerciais, o mecânico e químico (Chowdhury, 2020).

Com o crescimento exponencial de resíduos de painéis fotovoltaicos é previsto um aumento de 100 000 toneladas em 2016 para 60-70 milhões de toneladas em 2050 (Weckend et al., 2016; Statista, 2018).

O descarte inadequado de resíduos fotovoltaicos acarreta a perda de recursos valiosos e a dispersão de substâncias potencialmente perigosas contidas nos painéis, além de uma perda financeira.

Neste contexto, o valor potencial total do material recuperado através do tratamento e reciclagem dos painéis fotovoltaicos equivalem a USD 450 milhões até 2030. Isto corresponde ao atual valor da matéria-prima necessária para produzir 60 milhões de novos painéis ou 18 GW. Em comparação, 180 milhões de novos painéis foram produzidos em 2015 (IRENA, 2016).

Não se pode esquecer que a reciclagem eficiente de resíduos permite a produção de matérias-primas, injetando os materiais reciclados novamente na cadeia produtiva, recirculando a economia.

Outro ponto um tanto problemático da reciclagem é o da película encapsulante, que, atualmente, tem como método de reciclagem a incineração devido à dificuldade de separar os componentes. Assim, a incineração dos resíduos fotovoltaicos deve ocorrer separada de qualquer outro material, a fim de permitir a coleta das cinzas do fundo. Outro aspecto corresponde a necessidade de fornecimento uma certa massa crítica como insumo para sustentar a incineração (Ardente et.al., 2019). Com isto, a incineração controlada necessita de uma tecnologia especializada para controle ambiental adequado. Atualmente, quando ainda não se tem grandes volumes de resíduos fotovoltaicos, contar com uma certa massa crítica pode ser um limitante para incineração e exige um estudo mais aprofundado de proporção e do tipo de insumo para alimentar a incineração da película encapsulante.

Contudo, para a delaminação ou a remoção do encapsulante, vários métodos foram explorados, incluindo britagem mecânica (Giachetta et al., 2013), processamento térmico (Wang et al., 2012), solventes orgânicos (Kang et al., 2012), pirólise e detonação a vácuo (Berger et al., 2010), micro emulsões (Marwede e Reller, 2012) e radiação ultrassônica (Kim e Lee, 2012). Todos os processos de reciclagem precisarão se manter atualizados sobre as inovações contínuas dos painéis fotovoltaicos para obter os melhores resultados possíveis e custos aceitáveis nos processos de reciclagem.

Quantidades significativas de alumínio (aproximadamente 75.000 toneladas) e cobre (aproximadamente 7.000 toneladas) estão projetados para tratamento através da reciclagem usando infraestrutura disponível hoje (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016).

Já sobre o silício, seu uso foi reduzido significativamente durante os últimos dez anos, por volta de 16 gramas/Wp (pico de watts) para menos de 4 gramas/Wp, isto devido ao aumento da eficiência e wafers mais finos. Novamente, não se pode esquecer que as tecnologias de silício cristalino devem continuar a dominar mercado fotovoltaico. Desta forma, os custos necessários para recuperar o silício de painéis

solares reciclados são equivalentes a um terço para fabricação de silício novo (Choi e Fthenakis, 2010).

Contudo, a rentabilidade da reciclagem com base na recuperação de materiais, como alumínio, vidro e cobre atualmente é baixa (Choi e Fthenakis, 2014; D'Adamo et al., 2017) Esta baixa rentabilidade tem afetado negativamente os investimentos na coleta e tratamento de resíduos fotovoltaicos. Para aumentar a lucratividade tem-se que aumentar a pureza dos materiais reciclados, incluindo prata e silício (Peeters et al., 2017). Assim, Comissão Europeia reconheceu a necessidade de ações para recuperação do silício e outros materiais dos painéis fotovoltaicos, para reduzir sua condição crítica na economia europeia (EC, 2018), ou seja, utilizando os recursos limitados de forma eficiente, de maneira sustentável, minimizando os impactos ao meio ambiente (Weckend et al., 2016).

A prata recuperada de painéis fotovoltaicos também tem um valor potencial. Com base em uma estimativa de 90 toneladas recuperado em 2030 e a um preço atual de mercado (abril de 2016) (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016), a estimativa do valor de prata recuperada seria suficiente para produzir 50 milhões de novos painéis (IRENA, 2016).

A massa potencial recuperável de outros materiais, como zinco, níquel, gálio, índio, selênio telúrio e outros, é de 390 toneladas (IRENA, 2016).

Por exemplo, quantidade potencial recuperável de semicondutores é 310 toneladas, um número relativamente baixo em comparação com o outros materiais discutidos acima. No entanto, isso poderia ser usado para a produção de 40 milhões de novos painéis fotovoltaicos (IRENA, 2016).

Selantes e polímeros são difíceis de recuperar hoje. Novo processos de tratamento e reciclagem são necessários para criar valor para mais de 100.000 toneladas desses materiais e substâncias potencialmente recuperáveis até 2030 (IRENA, 2016).

Além disso, metais pesados como chumbo, estanho e cádmio também predominam nos painéis solares (Bakhiyi et al., 2014), podem poluir o meio ambiente e representar ameaças à saúde humana. Portanto, a recuperação de resíduos de painéis solares pode reduzir o desperdício de energia e a poluição ambiental (Cucchiella et al., 2015).

Nesse contexto, a rotulagem de painéis fotovoltaicos, para informar sobre a presença de flúor, favorece o processo de pirólise com notáveis vantagens: pode ocorrer em plantas menores, localizadas próxima ao pré-tratamento, reduzindo os impactos do transporte (Ardente et.al., 2019). No entanto, dependendo desta rotulagem, esta medida de utilização da pirolise para reciclagem, servirá para os painéis fotovoltaicos que chegarão ao mercado.

Com isto, temos na tabela 7 a seguir, o resumo de diversas tecnologias de reciclagem para painéis fotovoltaicos.

Tabela 7 - Tecnologias de reciclagem para painéis fotovoltaicos

Tecnologia	Métodos	Vantagens	Desvantagens	Referências
Separação de módulos	solvente orgânico	A pressão mecânica é crítica para suprimir o inchaço do EVA. O painel de silício foi recuperado com sucesso sem danos	Resíduos líquidos orgânicos produzidos	Doi et al. (2001)
	Comparou três métodos: desmontagem artificial, uso de solvente orgânico e tratamento térmico	O processo de tratamento térmico foi a solução ideal	Não envolveu a recuperação de recursos de silício	Dong (2009)
	Desmontagem artificial, britagem, quebra criogênica e separação eletrostática	Obteve uma mistura de diferentes tipos de materiais	Insuficiente para separação de um único componente; fase de pesquisa	Yingli Nova Energia Recursos Co., Ltd. da China
	Método ultra-sônico assistido por solvente orgânico	Reduz significativamente o tempo de dissolução do EVA em solventes orgânicos	Resíduos líquidos orgânicos produzidos	Kim e Lee (2012)
	Tratamento térmico e métodos de ataque químico	Separação de módulos	Bolachas de silício não purificadas	Klugmann-Radziemska e Ostrowski, 2010
Reciclagem de silício	Sistema de isolamento térmico à base de cimento e método químico	Reciclagem de silício	Resíduos líquidos orgânicos produzidos	Fernandez et al. (2011)
Reciclagem de metais raros	Moagem e hidrometalurgia	Reciclagem de índio e gálio	Alto preço de produtos químicos	Material raro Co. de Guangdong Xiandao, Ltd. (2011)
	Jateamento, processamento mecânico, dissolução do semicondutor, e precipitação, galvanização e troca iônica	Reciclagem de telureto de cádmio; custo líquido estimado em US \$ 0,04 - US \$ 0,06 / W	Alto preço de produtos químicos	Sasala et al. (1996)
	Reciclagem (CdTe e CIS) por tratamento mecânico úmido, como moagem e flotação, ou métodos de processamento mecânico seco, como jateamento a vácuo	Reciclagem (CdTe e CIS)	O processo é complicado	Berger et al. (2010)
	painéis foram quebrados e depois tratados termicamente ou quebrados com um martelo	Mistura de polissilício reciclado, silício amorfo e painéis solares de CdTe; vidro reciclado diretamente	Todos os tipos de misturas, difíceis de separar	Granataa et al. (2014)

Fonte: Yan Xu, 2018 (Adaptado).

5.5 Obsolência precoce

Os painéis solares fotovoltaicos não podem ser encarados como bens de consumo, quando modelos mais novos, que são mais baratos, eficientes substitua painéis em funcionamento adequado. Portanto, deve haver uma distinção clara entre 'obsolescência funcional', em que novas tecnologias torna um produto antiquado, do fim de vida, quando o produto não funciona mais (Mathur, D. et. al., 2020).

Estes equipamentos, os painéis solares, envelhecem a uma taxa esperada de 20% da vida útil, que atualmente é de 30 anos, correspondendo a menos de 1% por ano de perda de eficiência. Desta forma, se defeitos são descobertos durante a fase inicial de vida de um painel, os clientes podem reivindicar garantias dos fabricantes. Desta forma, dos painéis defeituosos podem ser devolvidos a um prestador de serviço parceiro ou o próprio produtor para inspeção e reparo. Com isto, os painéis

fotovoltaicos reparados podem ser revendidos como painéis usados com um preço de mercado reduzido de até aproximadamente 70% do preço de venda original de novos painéis. Assim, parcialmente reparados, painéis ou componentes, podem ser vendidos. Um modesto mercado de painéis usados já surgiu com suporte de plataformas virtuais como: www.secondsol.de e www.pvXchange.com.

Além do mais, existe a expectativa de alguns sistemas superam os 30 anos de vida útil nominal, criando mais uma boa oportunidade para um mercado secundário significativo de painéis usados e novos trabalhos de serviço de reparo no futuro (IRENA, 2016).

5.6 Toxidade

Deve-se lembrar que, no Brasil, os painéis fotovoltaicos são resíduos classe I: perigosos. Para proceder a esta classificação precisamos utilizar a NBR 10.004-07.

Os principais problemas ambientais ligados aos painéis fotovoltaicos, se não forem devidamente descartados, são: lixiviação de chumbo, lixiviação de cádmio, perda de recursos recuperáveis. Entre as perdas de recursos recuperáveis destaca-se (Yan Xu, 2018).

- 1 milhão de toneladas de Al;
- 0,3 milhão de toneladas de silício;
- 7,4 milhões de toneladas de vidro;
- Perda de metais raros recuperáveis (prata, índio, gálio e germânio).

Merece destaque o cádmio e chumbo. Essas duas substâncias perigosas produzem efeitos tanto em seres humanos como no meio ambiente, embora sejam responsáveis por menos de 1% do conteúdo dos painéis, estes metais pesados classificam os resíduos fotovoltaicos como perigosos, portanto, precisam ser enviados para um aterro de resíduos perigosos (Yan Xu, 2018).

Desta forma, sobre os parâmetros de classificações que determinam o perigo de um resíduo, países distintos podem apresentar classificações diferentes para os painéis solares, podendo ser considerados não perigosos ou resíduos perigosos com base nos resultados dos testes. Exemplo das diferentes legislações sobre a classificação dos resíduos está na tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Concentrações permitidas de lixiviado para um material residual

	EUA	Alemanha	Japão
concentração de lixiviado para chumbo	5 mg / l	-	0,3 mg / l
concentração de lixiviado para cádmio	1 mg / l	0,1 mg / l	0,3 mg / l

Fonte: IRENA, 2016, adaptado.

Painéis fotovoltaicos de CdTe e c-Si têm variações desde não detectado até 0,22 mg/l para cádmio; e de não detectado até 11 mg/l para chumbo. Assim, com base nos resultados dos testes, para diferentes jurisdições os painéis podem ser considerados não perigosos ou resíduos perigosos (Sinha; Wade, 2015).

Os estudos de toxicidade indicam que o cádmio é mais tóxico em sua forma elementar em comparação com o composto CdTe mais estável. No entanto, enquanto o cádmio não é emitido durante o funcionamento de rotina de um painel de filme fino, o CdTe é prejudicial se inalado, por exemplo, durante a fabricação ou processamento de tratamento de reciclagem. Também é prejudicial à vida aquática com efeitos duradouros, com isto, se os painéis de CdTe acabam em aterros sanitários, elementos tóxicos, principalmente de painéis danificados ou não encapsulados, podem ser lixiviados. Assim, em condições ácidas, semelhantes a aterros jovens, a concentração de lixiviado de CdTe se mostrou três vezes maior do que o permitido pelo teste de procedimento de lixiviação de característica tóxica dos EUA (Deng, R. et. al., 2019; Stewart, R. et. al. 2019). Portanto, quando necessário armazenamento, deve-se realizar em condições de pH neutro, à prova de vazamentos, lacrados ou revestidos, proporcionando uma medida de segurança adicional, principalmente de painéis fotovoltaicos danificados (Mathur, D. et. al., 2020).

5.7 Fonte de receita

A reciclagem de painéis fotovoltaicos em seu final da vida pode desbloquear um grande estoque de matérias-primas e outros componentes valiosos. O material recuperado injetado de volta na economia pode servir para a produção de novos painéis fotovoltaicos ou ser vendido, aumentando a segurança do fornecimento de matéria-prima. Estimativas preliminares sugerem que a matéria-prima tecnicamente recuperável de painéis fotovoltaicos pode produzir cumulativamente um valor de até US \$ 450 milhões, de 2016 até 2030, o que poderia produzir aproximadamente 60 milhões de novos painéis, ou 18 GW de capacidade de geração de energia. Já para 2050, o valor recuperável pode exceder cumulativamente US\$ 15 bilhões, o que equivale a 2 bilhões de painéis, ou 630 GW (IRENA, 2016).

Deve-se ressaltar que, esta lógica, característica da economia circular é mais do mesmo capitalismo consumista. Reconfigurar o modelo de consumo capitalista, ao invés poupar recursos naturais, constitui-se, inexoravelmente, em um adiamento das questões ambientais que ameaçam a vida natural no planeta.

No mais, com o surgimento de uma nova indústria de reciclagem de painéis fotovoltaicos haverá oportunidades de emprego, tanto no setor privado, ligado a reciclagem direta, como no setor público, ligados com a gestão dos resíduos e fiscalização. Igualmente, falhas precoces nos equipamentos podem gerar um mercado robusto de reparo. Além disto, um mercado de placas fotovoltaicas reparadas contribuiria para a abertura desta modalidade de geração de energia fotovoltaica, para produtores com menor poder aquisitivo, sendo também mais uma vez um propulsor para a reciclagem dos materiais solares.

Contudo, tem-se que denotar a necessidade de uma abordagem flexível, já que os resíduos fotovoltaicos tendem a ser caracterizado por volumes relativamente pequenos e modestos de desperdício, no entanto, seguido por um aumento repentino e dramático dentro de um espaço de tempo muito curto, isto porque, empreendimentos maciços, como usinas centralizadas, colocaram grandes massas de resíduos a disposição em um mesmo momento, enquanto seus volumes de descarte precoce permanecem modestos ao longo do tempo de vida útil esperado das placas fotovoltaicas. As implicações disso são duas: em primeiro lugar, que as formas

de gestão de resíduos podem ter que mudar ao longo do tempo; e em segundo lugar, o que pode ser inviável até determinado momento econômico pode se tornar um negócio rentável instantaneamente (Mathur, D. et. al., 2020).

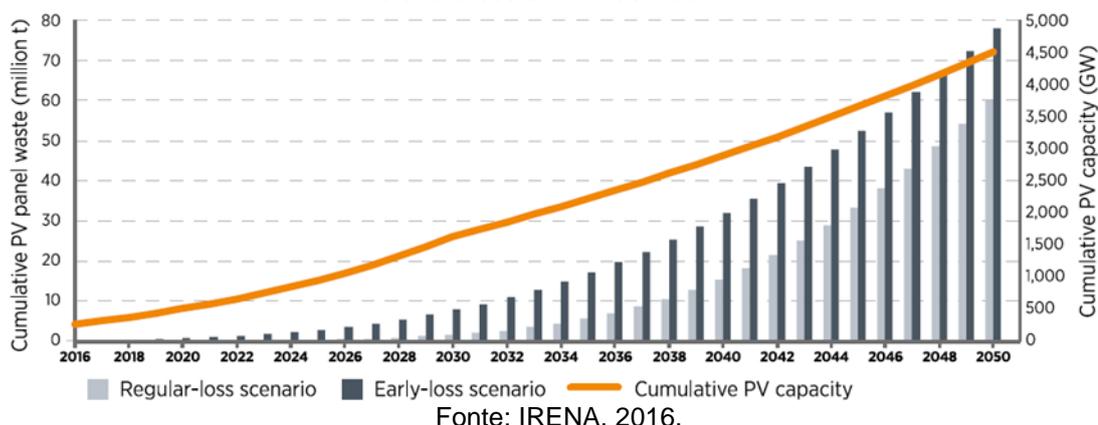
5.8 Disponibilidade materiais e resíduos energéticos solares.

Uma premissa fundamental dos estudos de descarte é a ausência de uma relação entre vendas unitárias e os fluxos de resíduos, ou seja, os volumes de vendas não equivalem ao volumes de resíduos. Como mostram os estudiosos de descarte, a ligação direta entre vendas e descarte não respondem pela vida social de coisas (Arjun A., 1986; Rathje et. al., 2001). Portanto, a dilatação do tempo entre o instante da venda e o instante que o objeto se torna resíduo trás complexidade a gestão dos resíduos enquanto estruturação da logística de disponibilidade dos materiais.

Demonstrar a relação entre consumo e descarte é complexo. As peças podem ser perdidas ou adicionadas; o tempo de vida pode ser reduzido ou prolongado por meio de atos de reparo, reutilização e redirecionamento de componentes; assim, peças podem permanecer em circulação à medida que adquirem novo valor para as pessoas (Cross J., Murray D., 2018). Nisto, como o total anual de lixo eletrônico no mundo hoje corresponde a aproximadamente a 41,8 milhões de toneladas (Baldé, 2015), em comparação, a projeção anual para os resíduos do painel fotovoltaico, não representarão mais do que 250.000 toneladas até o final de 2016 (IRENA, 2016).

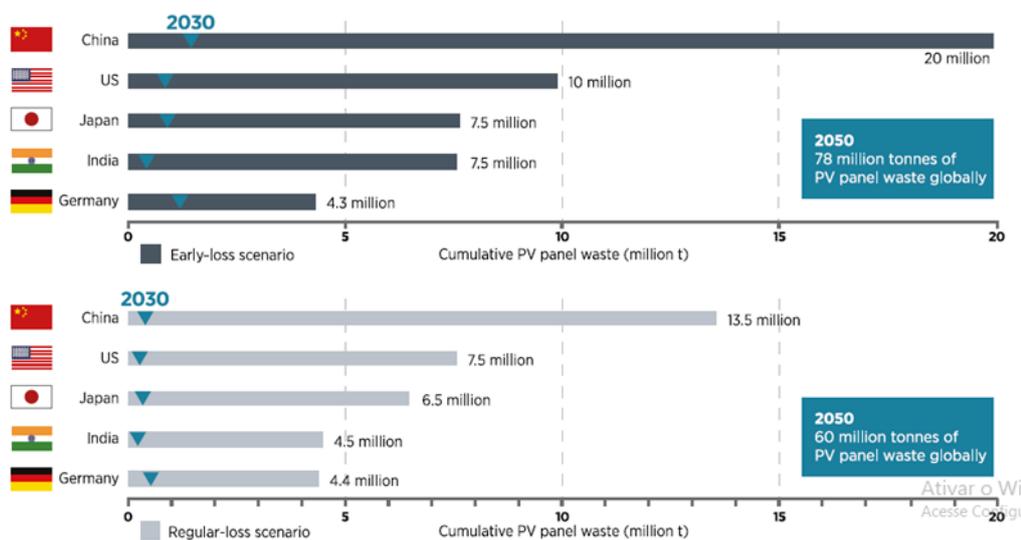
Contudo, as quantidades de resíduos fotovoltaicos globais aumentarão significativamente nos próximos anos. Projeta-se um grande aumento nos resíduos fotovoltaicos, que permanecerão progredindo constantemente atingindo 4% -14% em 2030 e subindo para mais de 80% em 2050, gerando mais de 60-78 milhões de toneladas métricas cumulativamente até 2050. O gráfico 21 a seguir exhibe os resultados cumulativos de resíduos dos painéis fotovoltaicos até 2050 (IRENA, 2016).

Gráfico 21 – Estimativa dos volumes de resíduos globais (milhões de toneladas) de painéis fotovoltaicos em fim de vida



Dado o aumento mundial na implantação de PV desde 2010, vida média e taxas de falhas precoces para painéis, os volumes de resíduos certamente aumentarão mais rapidamente após 2030. O gráfico 22 a seguir apresenta a perspectiva de geração de resíduos fotovoltaicos por países.

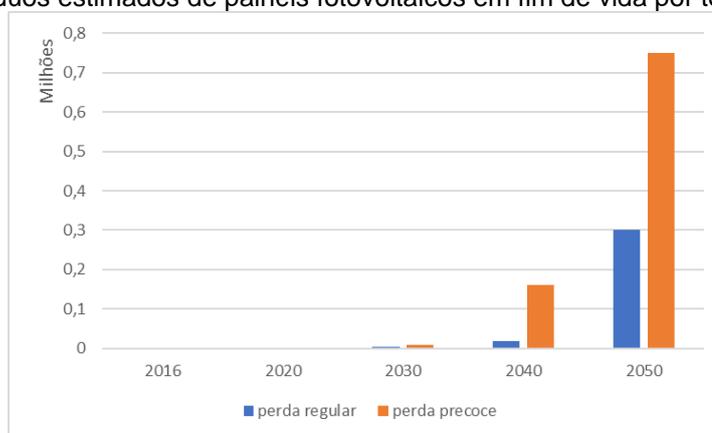
Gráfico 22 - Volumes de resíduos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida pelos cinco principais países até 2050 dividido por cenário de perda precoce (topo) e cenário de perda regular (parte inferior)



Fonte: IRENA, 2016.

A Gráfico 23 a seguir demonstra os volumes de resíduos cumulativos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida, por tonelada, para o Brasil, tanto no cenário de perda regular como no cenário de perda precoce.

Gráfico 23 - Resíduos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida por tonelada no Brasil



Fonte: IRENA, 2016 (adaptado).

Assim, assumindo indispensável a reciclagem, para as placas fotovoltaicas, temos materiais como: vidro, alumínio e cobre para painéis Silício cristalino (c-Si), que atualmente alcançam uma taxa de recuperação de maiores que 85% da massa total do painel de materiais não perigosos (IRENA, 2016). No entanto, os painéis também incluem materiais perigosos como prata, traços de estanho e chumbo. Materiais perigosos são tipicamente sujeitos a requisitos de tratamento rigorosos com classificações específicas dependendo da jurisdição. A longo prazo, usinas dedicadas a reciclagem de painéis podem aumentar a capacidade de tratamento dos resíduos. Como também, novas tecnologias podem contribuir para redução da utilização da materiais perigosos na fabricação dos equipamentos solares.

Relembrando que, os principais problemas ambientais ligados aos painéis fotovoltaicos, se não forem devidamente descartados, são: lixiviação de chumbo,

lixiviação de cádmio, perda de recursos recuperáveis e perda de metais raros recuperáveis, como prata, índio, gálio e germânio (Ding et al., 2012).

Assim, para o Brasil, para as projeções do potencial de exploração da geração fotovoltaica, considerando apenas a faixa de melhor irradiação de 6,0 a 6,2 kWh/m², estima-se a possibilidade de instalação de 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano. Dada a demanda atual de eletricidade e as projeções para 2050, essas grandezas são extremamente significativas (EPE, 2018).

Outro fator que se deve observar sobre o dimensionamento projetado da quantidade de placas utilizadas para gerar energia é o aumento da eficiência, que atualmente, é algo em torno de 15%. O aumento da eficiência das placas teria como consequência a redução da quantidade de placas necessárias para gerar a mesma quantidade de energia, produzindo assim, menos resíduos. Lembrando que a afirmação sobre o aumento da eficiência na geração não significa exatamente uma redução no tamanho da placa, que atualmente é em torno de 2,0m².

Como a geração fotovoltaica *off-shore*, mesmo com grande potencial, precisa ser melhor analisada (EPE, 2018). O aproveitamento da geração centralizada e da geração distribuídas excede a demanda de eletricidade nacional. Portanto, a geração fotovoltaica *off-shore* pode corresponder a um mercado de demanda internacional.

Contudo, todo esse quadro de expansão fotovoltaico, apartado de colaboração de mesma proporção, pode incorrer na transferência de um passivo ambiental, que se desconsiderado corresponde a um balanço incorreto da geração elétrica. Ou seja, não se pode considerar exclusivamente a capacidade de geração e o possível lucro, ignorando os custos do descarte dos materiais e os impactos ambientais decorrentes da atividade.

5.9 Análise do Ciclo de Vida (ACV)

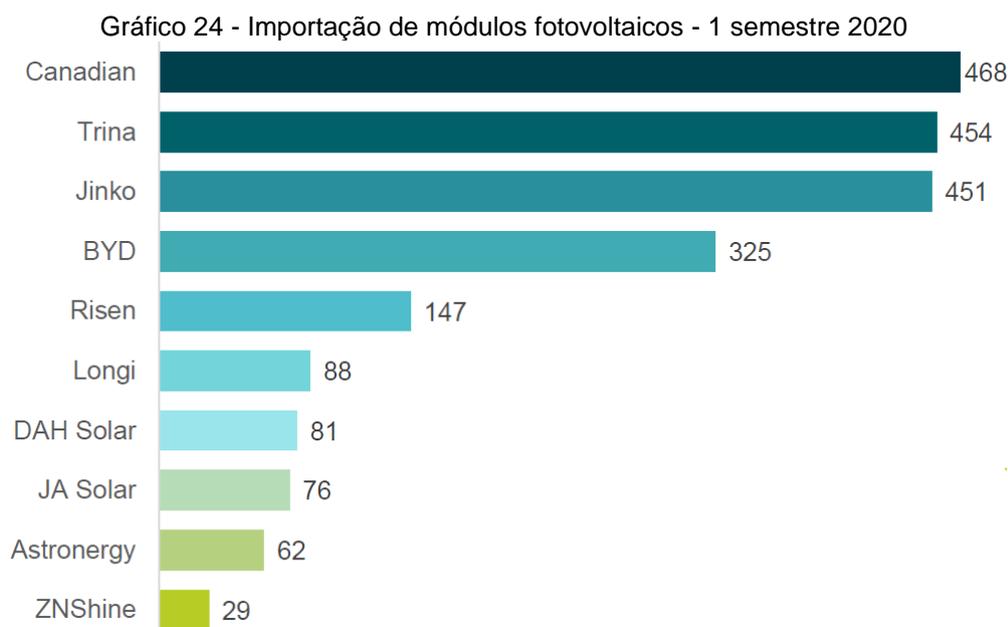
Para a Análise do Ciclo de Vida (ACV), deve-se levar em consideração o que disse o relatório da IRENA (2016), que inclui um fator de correção nas suas projeções devido os painéis se tornarem mais potentes e mais leve com o tempo, devido a novas tecnologias. Isso se deve à otimização da célula e designs de painel, bem como reduções de peso de molduras mais finas, camadas de vidro e *wafers*.

Estudos de tendências do setor sugerem que novas tecnologias de processo tornaram os *wafers* mais finos e mais flexíveis, como também novas estruturas, interconexões e técnicas de encapsulamento. Desta forma, por exemplo, *wafers* mais finos trarão uma redução de até 20% na camada do encapsulante (IRENA, 2016).

Sobre o progresso na economia de material e na eficiência dos componentes dos painéis fotovoltaicos ocorre uma tendência de redução no uso de materiais por unidade de energia e o uso de substâncias potencialmente perigosas. Com isto, para 2030, o teor de vidro dos painéis de c-Si está previsto para aumentar em 4% para um total de 80% do peso de painel. A principal economia de material incluirá uma redução no silício de 5% para 3%, uma diminuição de 1% no alumínio (Marini et al. (2014); Pearce (2014); Raithel (2014); Bekkelund (2013); NREL (2011) e Sander et al., (2007)).

Estes percentuais, por mais que possam ser significativos em toneladas acumuladas, não causa nenhum redimensionamento na previsão de logística e gerenciamento necessário para os resíduos das placas fotovoltaicas.

Agora, para efeito de dimensionamento de peso e volume dos resíduos fotovoltaicos, considerando uma placa de fabricante com evidente sucesso comercial de importação no território nacional, temos a Canadian, como mostra o gráfico 24 seguir:



Fonte: Greener, 2020.

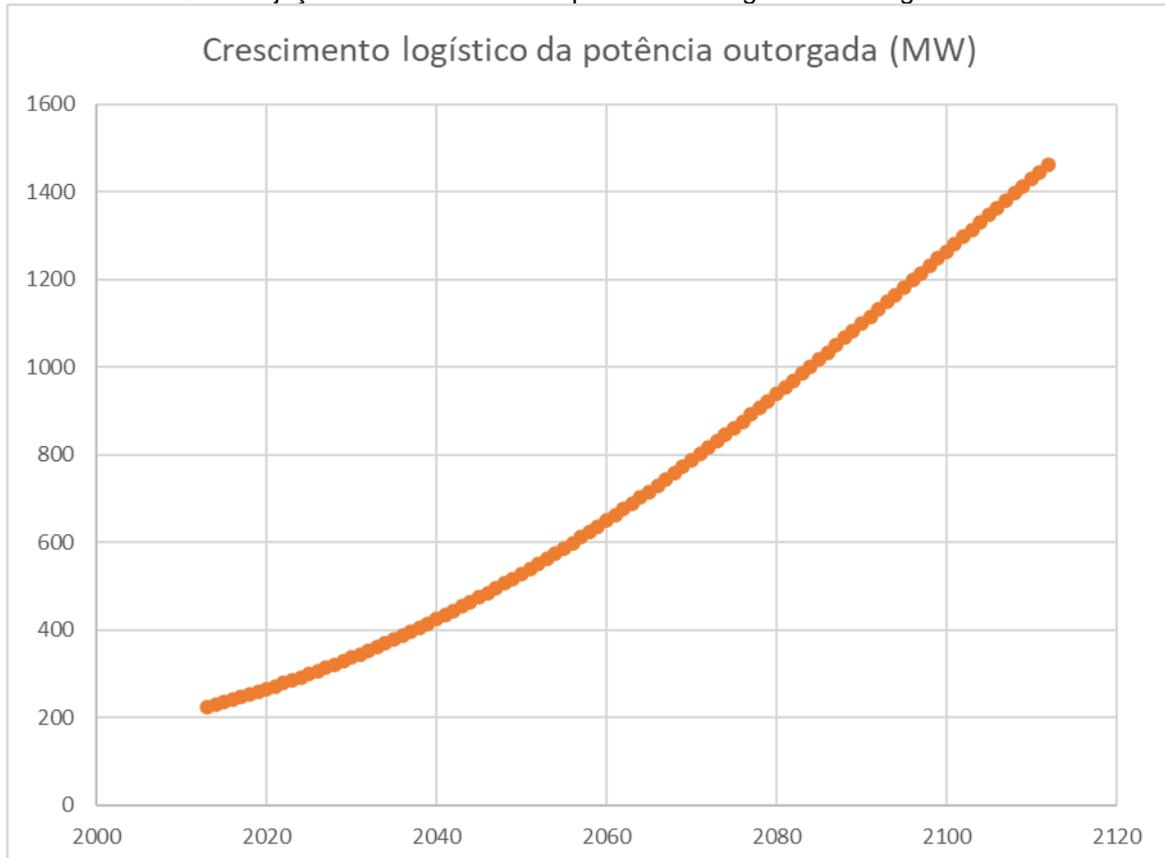
Desta forma, adotando como referência a placa do fabricante Canadian, a CS3U-350P, que possui uma Máxima Potência Nominal (Pmax) de 350 W, e um volume individual de 0,06944m³ e peso de 22,5kg; e considerando a potência outorgada dos empreendimentos fotovoltaicos somados (Tabela 1, página 37), realizou-se uma projeção de peso e volume das placas seguindo as três definições de usinas que encontramos aqui no Ceará: Empreendimentos previstos, em construção e operação. Para isto, bastou dividir a potência outorgada, em Watts, por 350 para saber a quantidade de placas, logo, multiplicando o número de placas pelo seu peso e volume individual tem-se o peso e o volume total. Assim, formulou-se a tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Projeção de peso e volume dos resíduos fotovoltaicos para o Ceará

	Quantidade de placas	Peso (Toneladas)	Volume (m ³)
usinas em operação	622.857	14.014	40.330
usinas em construção	795.420	17.897	51.503
usinas previstas	5.550.731	124.891	359.410
Total	6.969.009	156.803	451.243

No entanto, é notório o crescimento vertiginoso na eficiência das placas, o que contribuirá para a redução da quantidade, gerando a mesma energia. Exemplo disto são as placas bifaciais que anuncia uma eficiência de 25%. Desta forma, a projeção dos resíduos se torna mais consistente levando em consideração a expansão da Potência outorgada, ou seja, adotando-se as características de qualquer placa disponível no mercado, pode-se refazer o mesmo cálculo para dimensionamento do peso e volume dos resíduos solares. Adotando-se uma curva de crescimento logística temos o seguinte gráfico 25:

Gráfico 25 - Projeção do crescimento da potência outorgada de energia solar fotovoltaica



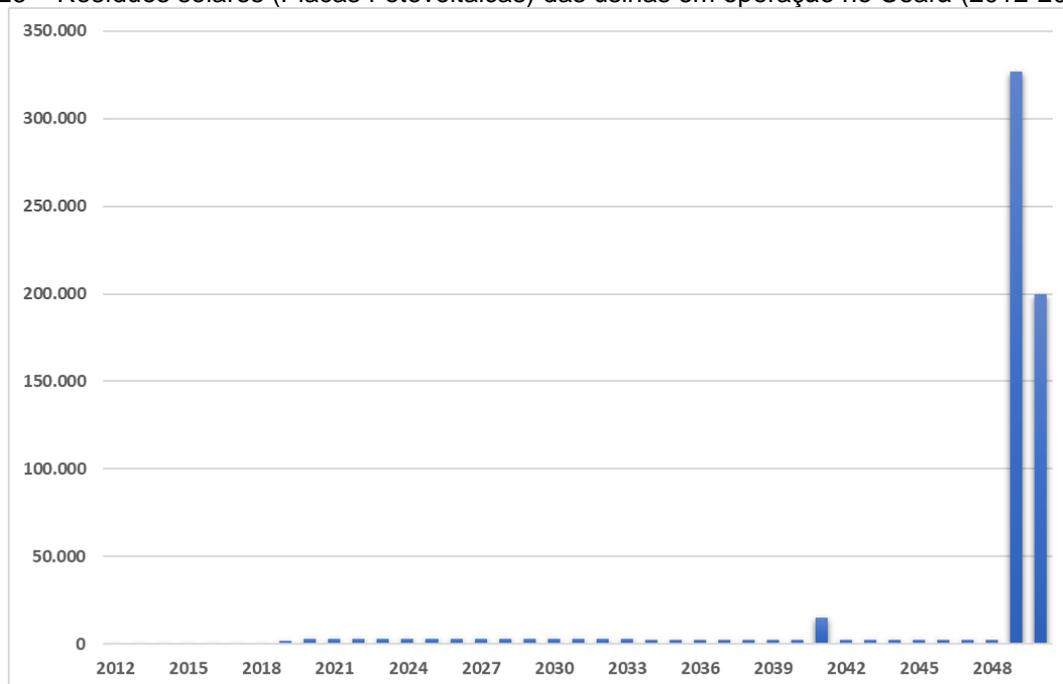
Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021.

A projeção foi baseada na seguinte fórmula: $P = \frac{P_s}{1 + c \cdot \exp(K_1 \cdot (T - T_o))}$, onde P é a potência, $P_s = 2.439,15$ (potência de saturação, relacionada a total de usinas solares), $c = \frac{(P_s - P_o)}{P_o}$, $K_1 = \frac{1}{T_2 - T_1}$. $\ln \left[\frac{P_o \cdot (P_s - P_1)}{P_1 \cdot (P_s - P_o)} \right]$. Onde $P_o = 218,00$ (W), $P_1 = 278,40$ (W), $T_o = 2012$, $T_1 = 2022$, $T_2 = 2032$.

No entanto, pela falta de concretude dos dados projetados quando não se sabe a data de finalização dos empreendimentos em construção, como também é desconhecido o início das obras das usinas previstas, faz-se necessário o dimensionamento do número de placas que deixarão de funcionar considerando, exclusivamente, os empreendimentos em operação, que, desta forma, têm data de início das atividades, portanto, proporcionado um cálculo sobre a geração de resíduos em escala cronológica de 30 anos, que é a expectativa de vida de uma placa fotovoltaica. Outro fator para o dimensionamento das usinas em operação é a consideração de perda precoce de 7% em 15 anos, portanto, um fator de perda de 0,47 ao ano. Com isto, temos o gráfico 26 a seguir das placas quando resíduos para

Geração Centralizada (GC) usando como referência a placa Canadian CS3U-350P, citada anteriormente.

Gráfico 26 – Resíduos solares (Placas Fotovoltaicas) das usinas em operação no Ceará (2012-2050)



Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021.

Já para a Geração Distribuída (GD), considerando como agente dos dados a ENEL Ceará, na modalidade de geração na própria Unidade Consumidora (UC), portanto ligada a rede e com anuência da concessionária, temos as seguintes classes de consumo como mostra a tabela 10 a seguir:

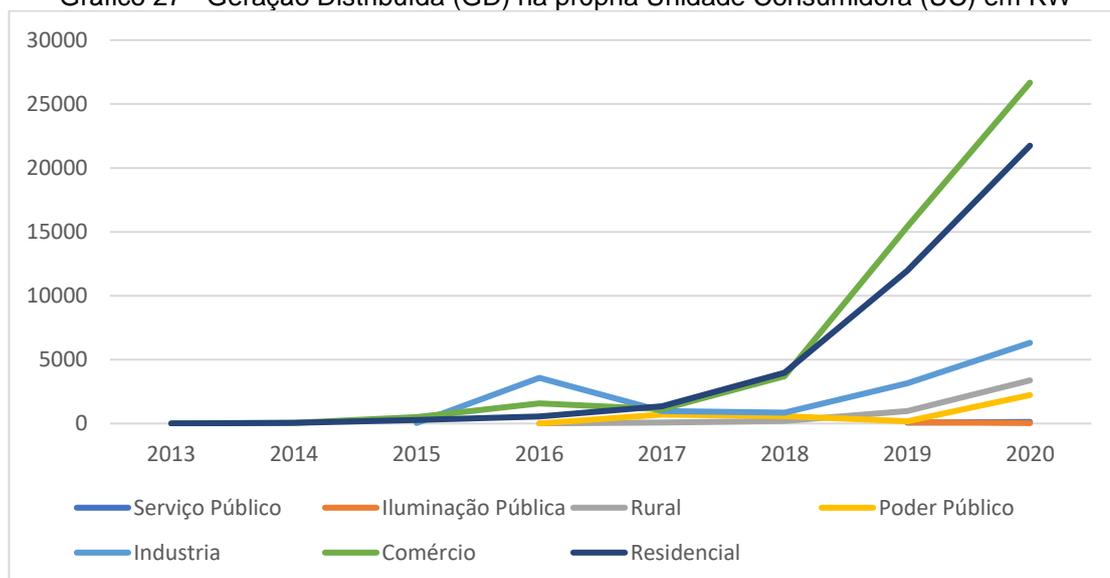
Tabela 10 - Geração Distribuída (GD) na própria Unidade Consumidora (UC) em KW

	Serviço Público	Iluminação Pública	Rural	Poder Público	Industria	Comércio	Residencial
2013				52,2	11,5	13,9	2,5
2014						43,2	57,0
2015					42,8	499,1	285,1
2016			13,4	5,0	3.563,1	1.564,4	556,2
2017			72,4	694,7	975,5	1.119,1	1.343,1
2018			200,1	575,0	845,0	3.705,3	3.971,6
2019	70,0	99,6	987,8	187,5	3.162,1	15.407,9	11.977,8
2020	125,0	34,0	3.374,4	2.227,8	6.316,4	26.672,5	21.742,7

Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 28/07/2021.

O gráfico 27 a seguir demonstra a crescimento por modalidade de geração, quando se destaca, quantitativamente, a geração oriunda do comércio e residencial:

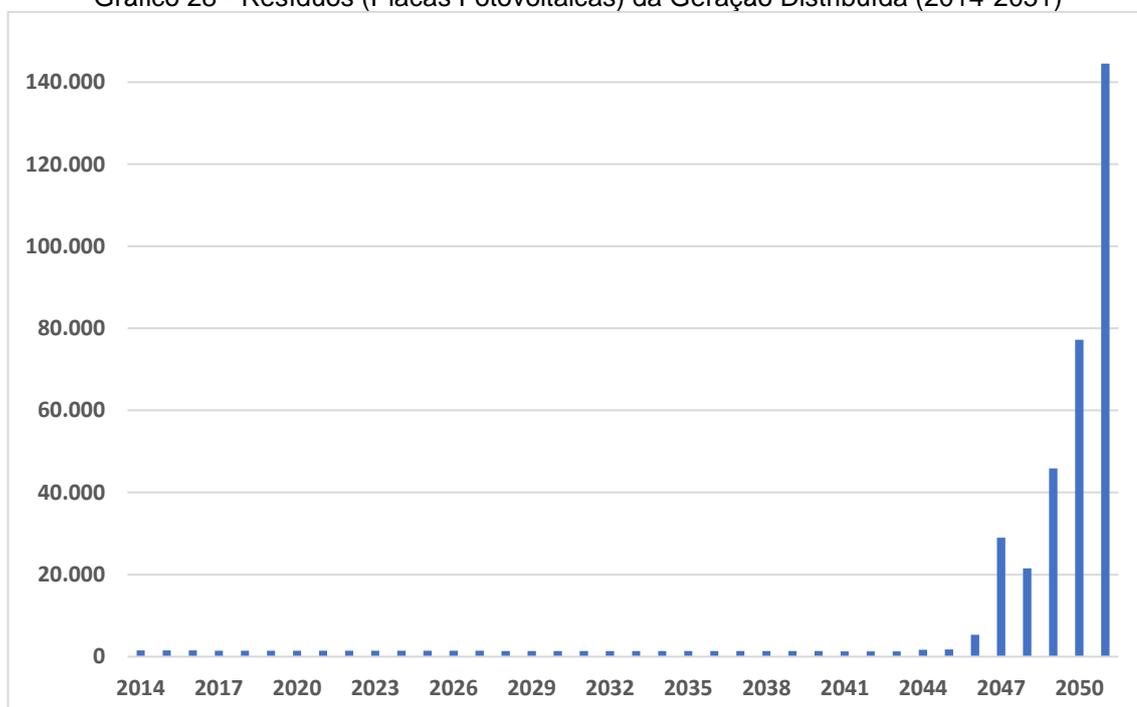
Gráfico 27 - Geração Distribuída (GD) na própria Unidade Consumidora (UC) em KW



Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 28/07/2021.

Desta forma, novamente adotando a placa do fabricante Canadian, a CS3U-350P como referência, que possui uma Máxima Potência Nominal (Pmax) de 350 W, procedeu-se cálculos semelhantes descritos anteriormente para quantificação dos resíduos oriundos das placas fotovoltaicas, considerando um fator de perda de 0,47 ao ano, tem-se o gráfico 28 a seguir:

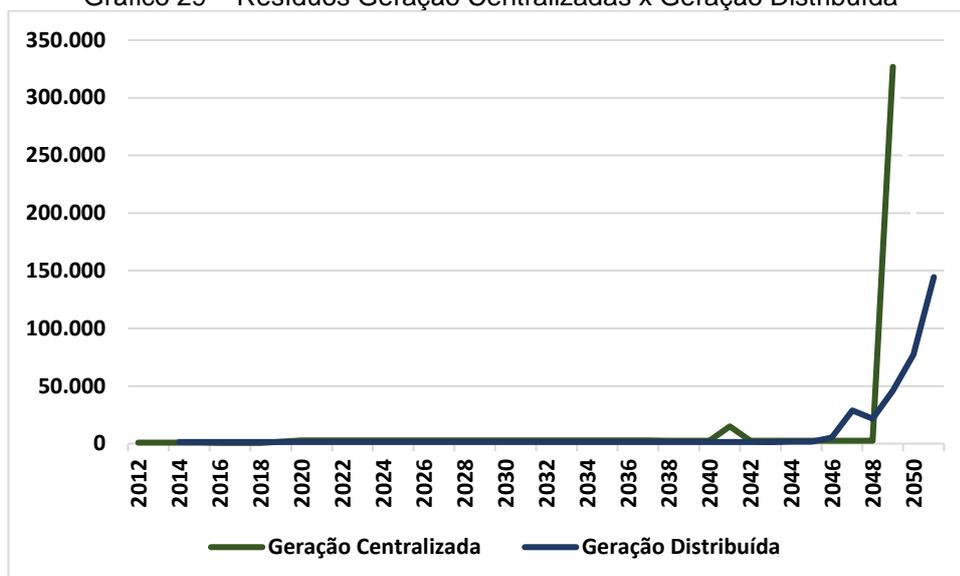
Gráfico 28 - Resíduos (Placas Fotovoltaicas) da Geração Distribuída (2014-2051)



Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 28/07/2021.

Comparando as duas projeções, tanto dos resíduos de Placas Fotovoltaicas oriundos da GC como da GD temos o gráfico 29 a seguir:

Gráfico 29 – Resíduos Geração Centralizadas x Geração Distribuída



Fonte: o autor baseado nos dados: <https://app.powerbi.com>, acesso em 28/07/2021.

O gráfico 29, logo acima, permite fazer algumas inferências sobre a deposição de resíduos nas duas modalidades de geração, a centralizada e distribuída, visto que a quantidade de resíduos da Geração Centralizada é mais que o dobro da Geração Distribuída. Contudo, ambas gerações preservam uma perspectiva de produção de resíduos abrupta em comparação do cotidiano do ciclo de vida com o fim da vida útil.

5.10 Logística reversa

Primeiro ponto que se coloca é: na ausência de regulamentos que obriguem a reciclagem, a maioria dos resíduos fotovoltaicos é descartada em aterro porque é a opção mais barata (Mathur, D. et. al., 2020). No entanto, é exatamente isto que se quer evitar. No Brasil, os painéis fotovoltaicos são classificados como Resíduos Eletro Eletrônicos e, conforme o art.33 da PNRS, devem seguir programa de logística reversa.

O sucesso de qualquer programa de reciclagem é baseado em logística reversa. A logística reversa apresenta-se como um desafio para qualquer sistema de gerenciamento de resíduos, assim, estes desafios são exacerbados pela geografia física, infraestrutura de transporte e padrões de assentamento dos sistemas de geração fotovoltaica fora da rede de distribuição (Cross J.; Murray D., 2018).

Deve-se esclarecer que, além da placa fotovoltaica, outros elementos do sistema como cabos e inversores, tomados de empréstimo de diferentes atividades energéticas, têm uma logística própria, ou deveriam ter, independente da tecnologia fotovoltaica. Portanto, a metodologia proposta aqui concentra-se nas placas fotovoltaicas. Desta forma, mesmo que os sistemas fotovoltaicos venham contribuir para o volume dos resíduos eletrônicos, além das placas, estes componentes não são novidade no mercado e não deveriam ser diante das legislações ambientais regionais que tratam do descarte do lixo eletrônico.

Outro aspecto que se deve considerar diz respeito a uma economia de reparos, que está posta hierarquicamente antes da reciclagem. Desta forma, haveria um pré-

processamento dos resíduos solares que se integra a um processamento final, desde porções menos complexas até aos resíduos perigosos. Neste contexto, pode-se mapear essa abordagem do processamento de resíduos, desde o descarte ocorrido no reparo dos equipamentos fotovoltaicos, até um descarte final, do rejeito, quando não há mais reparo possível. Neste cenário, de uma geografia global desigual das instalações de processamento de resíduos gerados, pode-se inferir o surgimento de uma indústria de descarte através de meios manuais, mais rudimentares, até instalações com maior desenvolvimento tecnológico. Com isto, seguindo um mapa da desigualdade de recursos tecnológicos, projeta-se uma rota de mercados fornecedor de material para reciclagem, oriundo de instalações providas de técnicas rudimentares de pré-processamento, para instalações de maiores recursos tecnológicos, como método de processamento final.

Tal abordagem, das diferenças de recursos para reciclagem, traz o risco da manutenção de um ecossistema de reparo, reutilização, reaproveitamento e reciclagem, que privilegia os sistemas detentores de mais recursos e infraestrutura. Somente adotando-se um ecossistema de reparo ético pode-se equacionar esta desigualdade (Lepawsky et al., 2017).

Neste sentido, para o desenvolvimento de um mercado de painéis fotovoltaicos é necessário a construção de uma base de dados estatísticos para fomentar a viabilidade deste mercado. Esta base de dados deve apresentar regularidade do monitoramento dos sistemas implantados, estabelecendo uma perspectiva da geração de resíduos, com as quantidades geradas através das falhas precoces dos equipamentos. O registro de disponibilidade destas informações contribuirá para o estabelecimento da infraestrutura necessária para a gestão, tanto dos resíduos solares, como do reparo de equipamentos. Nisto, vale ressaltar a atualização ocorrida no inventário do sistema declaratório anual de resíduos sólidos do IBAMA. Assim, o Acordo Setorial para implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes foi assinado no dia 31/10/2019 e teve seu extrato publicado no D.O.U de 19/11/2019. Portanto, por meio do Acordo Setorial, os integrantes da cadeia produtiva dos equipamentos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes se comprometem a realizar uma série de ações para atender a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Com isto, cada gerador precisa declarar seus resíduos, conforme a classificação publicada pelo IBAMA. Os Resíduos Eletroeletrônicos (REE) estão dentro dessa lista, onde consta os painéis fotovoltaicos, sob a Nomenclatura Comum do Mercosul nº 8541.40.32

Outro aspecto importante refere-se sobre quem produz a energia fotovoltaica, e exige uma distinção válida para a classificação destes, e que afeta o descarte. Neste contexto, produtores domésticos não devem receber o mesmo tratamento de geradores comerciais, assim como, sistemas off grid, que atendem uma situação mais frágil do consumo de energia, merecem atenção especial para o descarte.

Além da reciclagem para oportunizar matéria para novos painéis, apresentam-se outras oportunidades para tratamento dos resíduos solares, como a incorporação dos materiais reciclados para a produção de materiais da construção civil. Esta é uma solução potencial para a reciclagem de resíduos de silício derivados dos painéis solares de vidro silicioso, que exigem uma logística reversa sólida. Por exemplo, a sepiolite, contida no silício, é um mineral de argila fibrosa que pode ser misturado com a matéria prima, e, devido às suas características físico-químicas, confere uma cor branca excepcional às cerâmicas, e ainda conferindo um aumento na resistência

mecânica dos corpos de prova fabricados com esta mistura. Além disso, a reciclagem de resíduos de vidro a partir de painéis solares traz um importante valor agregado do ponto de vista ambiental (Jimenez-Millan et. al., 2018). Desta forma, mais uma vez se confirma a necessidade da logística reversa, como forma de garantir as quantidades de matéria prima para a aplicação em atividades diversas, como na construção civil.

A questão da necessidade de reciclagem dos painéis fotovoltaicos já se concretizou como uma preocupação e as pesquisas se tornam mais abundantes. Uma pesquisa interessante corresponde ao desenvolvimento de sistemas móveis para reciclagem dos painéis, que oferecem a possibilidade de garantir um tratamento adequado, reduzindo os investimentos (Grassi et. al., 2018) e atendendo, de modo mais ágil, as necessidades da logística reversa.

5.11 Um sistema de gestão e financiamento

Para o gerenciamento de fim de vida dos painéis fotovoltaicos deve-se desencadear uma importante indústria de tratamento e reciclagem. Com isto, comum este setor, de gerenciamento de resíduos, receber regulação pelos governos. Portanto, a atenção do governo diante da necessidade de regulamentação deste setor pode criar valor para o país, possibilitando a instalação de uma indústria de tratamento e reciclagem de referência, para isto, sendo necessário articular um esquema de financiamento.

Esquemas de financiamento para os resíduos encontram duas abordagens em destaque:

- a) Pague conforme usar, onde o custo de coleta e a reciclagem é coberta pelos participantes do mercado quando ocorre o descarte;
- b) Pague conforme colocar, corresponde a um esquema de responsabilidade solidária, onde os produtores compartilham as responsabilidades pela coleta e reciclagem de resíduos para um produto ou grupo de produtos específico.

O esquema de pré-financiamento, pague conforme usar, para coleta e a reciclagem de alto volume de lixo eletrônico, como painéis fotovoltaicos, não provou ser rentável (IRENA, 2016).

Por outro lado, uma abordagem de pagamento conforme colocar, além de um pagamento adiantado para coleta e reciclagem, ocorre a estimativa dos custos quando um produto chega ao fim de vida. Nesta abordagem, o “último homem de pé”, assegura a coleta, caso todos os produtores desaparecerem do mercado. Nessa situação, o seguro cobre os custos de coleta e reciclagem (IRENA, 2016).

Pensando a normatização política para reciclagem, um sistema de gestão de resíduos deve considerar os custos gerais de operação. Portanto, para fornecer a base financeira para a reciclagem em fim de vida dos painéis fotovoltaicos, vários modelos de taxas foram desenvolvidos e implementado em todo o mundo. Parte dessas taxas é reservado para financiar o sistema de tratamento de resíduos, quando os produtos em fim de vida são entregues em pontos de coleta, operados por municípios, concessionárias, atacadistas, produtores ou seus prestadores de serviços. (IRENA, 2016).

Ainda sobre a abordagem público-privada, temos o ciclo fotovoltaico, criado em 2007, que é um exemplo de um esquema voluntário que inclui um sistema com base em uma parceria público-privada entre indústria e reguladores europeus. Assim, uma associação foi estabelecida pelos principais fabricantes de painéis fotovoltaicos, e é totalmente financiado por empresas membros, para que os usuários finais possam devolver os equipamentos em mais de 300 pontos de coleta em toda a Europa. Desta forma, a associação dos fabricantes cobre a operação de coleta, transporte, reciclagem e relatórios a partir dos pontos de entrega. (PV CYCLE, 2016).

Esta opção acima desonera o consumidor final e retorna lucro para os fabricantes associados, que ainda desenvolvem tecnologia a partir do financiamento de pesquisa.

Portanto, um mecanismo potencial para mitigar os custos da gestão e do transporte dos resíduos solares podem ser a formulação de pontos de coleta descentralizados nas cidades e nas principais comunidades. Estes pontos de coleta descentralizados fariam o armazenamento e tratamento prévio. Além disto, estes estabelecimentos poderiam abrigar pontos de venda de painéis usados e serviços de reparo. Todos estes aspectos, armazenamento, tratamento prévio, venda de usados e reparo representam potenciais oportunidades negócios e geração de emprego (Mathur, D. et. al., 2020). Além dos mais, estes pontos promoveriam a logística reversa, que pode reduzir ainda mais os custos de transporte.

Neste contexto, uma proposta que se destaca é a de formulação de um sistema de código de barras ligado a um sistema centralizado de um banco de dados para os painéis fotovoltaicos individuais. A partir da leitura do código de barra de cada painel teríamos a sua localização, registrando cada vez que fossem removidos, assim, monitorando sua vida útil. Este sistema facilitaria previsões mais precisas e modelagem dos fluxos futuro de resíduos solares fotovoltaicos. A capacidade de rastrear painéis individuais também seria útil no estabelecimento de um sistema de qualidade para o mercado de reutilização de painel. No caso, os painéis poderiam ser rastreados desde o momento em que deixam as fabricas até a sua disposição final. Portanto, além dos dados de localização, outros dados que podem ser coletados como desempenho do painel e histórico de reparos, que contribuiria para o mercado de painéis usados, que não atingiram o fim da sua vida útil (Mathur, D. et. al., 2020).

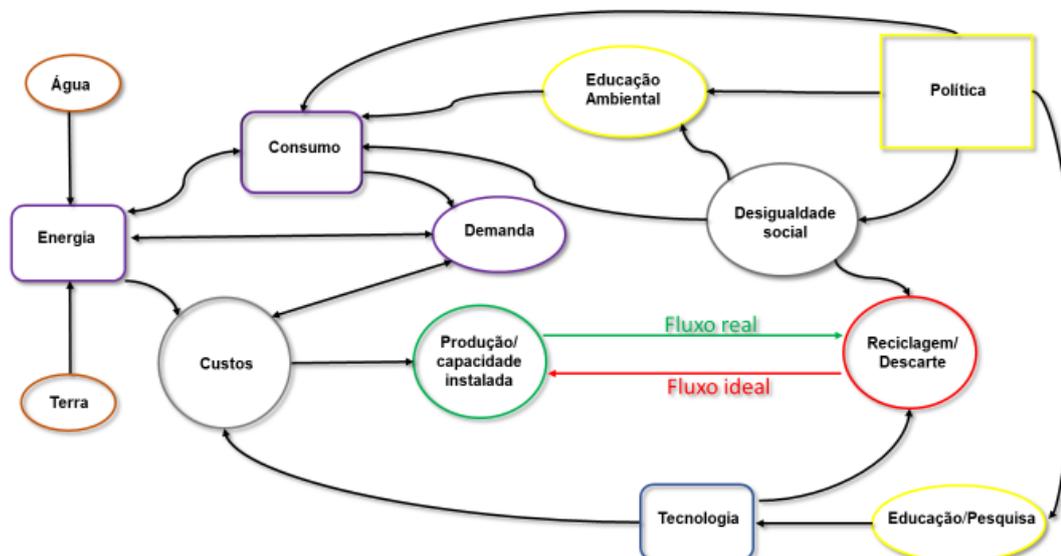
Entretanto, pela revisão da literatura, parece que a maioria, senão todas as soluções potenciais para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos requerem grandes volumes, na ordem de 20.000 toneladas, e ainda uma distância da área de captação relativamente pequenas, na ordem de 100 km ou 250 km (Mathur, D. et. al., 2020).

5.12 Nexo

Se a produção estivesse atrelada a capacidade de reciclagem e as condições de descarte? Essa pergunta norteia a incorporação de mais um totem para a análise sinérgica que propõe o conceito de nexo. A partir desta incorporação quais elementos fazem parte de conjunto interpretativo do nexo?

A figura 8, a seguir, propõe uma análise das interações que se fazem presentes diante da perspectiva de análise que estabelece o arcabouço conceitual do nexo e a proposta do descarte das células fotovoltaicas:

Figura 8 – Fluxograma do nexo de interações para o descarte



Fonte: O autor

Diante do fluxograma apresentado, um dos principais componentes de fundamentação refere-se à educação, assim, programas de pesquisa e educação são essenciais não apenas para alcançar os objetivos técnicos, mas para treinar a próxima geração de cientistas, engenheiros, técnicos, gerentes etc. Além disso, educação específica e o treinamento em reparos de painéis fotovoltaicos pode ajudar a estender a vida útil dos painéis fotovoltaicos que mostram falhas iniciais (IRENA, 2016). Em caráter mais amplo e permanente, o investimento em educação, com vistas aos impactos ambientais, pode criar uma cultura de exigência de redução destes. Oriunda da educação e emanada do povo, a exigência pela proteção ambiental, tem um caráter permanente na sobrevivência da memória coletiva, já que, através da educação pode-se alcançar a consciência sobre as questões ambientais e suas urgências para o desenvolvimento econômico e a saúde dos ecossistemas.

Neste contexto, outro elemento de grande relevância apontado no organograma são as políticas, e sua influência sobre a educação. Politicamente temos as definições de como teremos a disponibilidade de educação para a sociedade. Dois aspectos das políticas educacionais são destacados para o descarte dos módulos fotovoltaicos. O primeiro diz respeito a educação/pesquisa. Este aspecto destaca-se, visto que as pesquisas sobre os modos de operação e mecanismos para reciclagem estão em pleno desenvolvimento. Já o outro aspecto, diretamente afetado pelas definições políticas, é a educação ambiental. A educação ambiental igualmente se mostra imprescindível para compreensão social dos impactos causados pela geração de energia de fontes não renováveis, de origem fóssil, e a necessidade da transição para fontes renováveis, como forma de mitigar estes impactos. A amplitude da educação ambiental reflete a desigualdade social ao passo que, numa sociedade como a brasileira, em que a educação tem sido sistematicamente atacada pelo atual governo do presidente Bolsonaro (2019-2023), educação é um luxo quando o acesso tem sido restringido. Os cortes de verba têm se aprofundado, sejam para os níveis superiores ou para a educação básica. Assim, em uma sociedade com a educação

marginalizada, a desinformação tem sido o discurso dominante. A ignorância, como lugar de ausência da educação formal, afeta diretamente o acesso ao consumo. Uma população com mais acesso à educação reivindica melhores oportunidades de emprego, o que gera acesso ao consumo. O consumo consciente, em relação aos impactos ambientais, é fruto da educação ambiental.

Sobre o consumo, a relação com a geração de energia é evidente. Quanto maior o desenvolvimento econômico de uma sociedade maior a exigência para a geração e consumo de energia. Por sua vez, a necessidade de uma expansão da geração de energia, que é natural para uma sociedade que expande seu consumo, exige também um maior consumo de água e território para promover essa geração de energia. O consumo de água e terra para geração de energia compete com a necessidade de água e terra para produção de alimentos. Esse é o mote para o nexo, como esses setores estão ligados e se afetam.

Pensando na geração de energia fotovoltaica, ela apresenta uma pressão sobre os recursos naturais, de onde vem as matérias primas. A pressão sobre os recursos naturais é o conjunto onde todo fluxograma do nexo de interações para o descarte está contido. Tudo isso desemboca em custos. Assim, temos os custos envolvidos para a produção dos equipamentos, instalação e operação dos sistemas fotovoltaicos. A redução dos custos dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos implica na proliferação destes sistemas de geração, seja pela geração centralizada ou descentralizada. Enfim, quanto maior a geração fotovoltaica maiores serão os fluxos de interação e a exigências dessas conexões.

Por fim, temos uma capacidade fotovoltaica instalada, que vai indubitavelmente, desembocar no descarte. Portanto, se houvesse o atrelamento da produção ao descarte, de modo que produtores só pudesse colocar novos produtos no mercado quando respondessem pelos equipamentos postos para o descarte, teríamos uma responsabilidade ao longo de toda a linha de consumo sobre os recursos naturais.

6) Resultados e Discussões

Para início do desenvolvimento e expansão da tecnologia fotovoltaica houve uma dependência de um ambiente político favorável, com formas de subsídio para incentivar a aceitação em muitos países (Carrington, G.; Stephenson J., 2018). Contudo, para investir em energia solar fotovoltaica, serão cada vez mais desnecessários subsídios secundários para torná-la atraente financeiramente (Karneyeva Y.; Wüstenhagen R, 2017), isto fruto das reduções constantes nos custos das tecnologias fotovoltaicas. Mas esta realidade, da não necessidade de subsídios ainda se constitui distante para o Brasil, visto que ocorre atualmente uma busca maior pelos sistemas fotovoltaicos antes que se retire o subsídio concedido aos novos empreendimentos de energia limpa em 2022, pela sanção do governo decorrente da medida provisória 998/2020.

Seguindo para o fluxo de resíduos solares, diante da análise da abordagem regulatória em diferentes mercados, o esquema de responsabilidade estendido ao produtor provou ser uma abordagem eficaz para o gerenciamento de muitos tipos de resíduos, especialmente o lixo eletrônico (Weckend et al., 2016)

Contudo, a questão da responsabilidade ambiental, do Princípio da Precaução, deve ser reforçada nos regulamentos e leis existentes, ou seja, as medidas de incentivo devem ser legisladas, obrigando os produtores a participar das atividades de coleta e reciclagem, estabelecendo novas redes de logística reversa e tecnologias de fabricação. Estas são medidas de gênese de uma cadeia de fornecimento verde (Qu, 2015). Portanto, são atitudes que antevendo os impactos ambientais, podem minimiza-los, racionalizando o uso de recursos através dos processos de produção, coleta e reciclagem (Miao, 2015). Neste contexto, o uso de materiais reciclados na produção de novos painéis deve ser incentivado através da definição de porcentagens-alvo, garantindo ao mesmo tempo o desempenho qualidade e a segurança do produto (Yan Xu et. al., 2018). Todavia, a avaliação da eficiência dos recursos fotovoltaicos reciclados em relação aos benefícios do aumento das taxas de recuperação dos resíduos permanece inexploradas (Ardente, F. et. al. 2019). Esta é uma lacuna que precisa ser reparada para o andamento da indústria de reciclagem fotovoltaica.

Sobre o modus operandi da reciclagem dos painéis fotovoltaicos em fim de vida, normalmente são processados em usinas de reciclagem. Nestas usinas, o foco é a separação mecânica dos principais componentes e materiais dos painéis fotovoltaicos. Contudo, alguns materiais de maior valor, que constituem pequena massa, podem não ser totalmente recuperados. Por isso, a construção de plantas dedicadas a reciclagem de painéis fotovoltaicos pode aumentar a capacidade de tratamento e maximizar as receitas devido a melhores qualificações e especializações técnicas, além disso, pode aumentar a recuperação de constituintes valiosos.

Neste contexto, do mercado para a reciclagem dos painéis fotovoltaicos, segundo a metodologia aplicada para o dimensionamento do potencial de geração de energia fotovoltaica, utilizada no Atlas eólico solar: Ceará (2019), o desenvolvimento de apenas 10% do potencial solar representaria mais de 30 vezes a capacidade instalada fotovoltaica centralizada em todo Brasil atualmente (2,1 GW). No entanto, a exploração de tal capacidade depende de outros aspectos e limitações econômicas, tecnológicas e de infraestrutura estadual e federal, tornando, portanto, pouco provável

seu pleno desenvolvimento (Schubert, 2019). Desta forma, caso seja esse o direcionamento político do estado do Ceará para questão, reciclar, este será um mercado imenso que poderá colocar o estado na rota da reciclagem nacional e até internacional dos painéis fotovoltaicos.

Portanto, em escala global, tem-se assistido ao amadurecimento da coleta e reciclagem de painéis fotovoltaicos. No entanto, programas de parceria público e privada não alcançaram os resultados desejados, necessitando de regulamentação mais claras sob fiscalização estatal. Com isto, a experiência dos países relatados neste trabalho aponta para necessidade da implantação de políticas de gerenciamento de fim de vida, que contribuam para o tratamento e reciclagem dos painéis fotovoltaicos. Para o sucesso da gestão desses resíduos torna-se imprescindível a adaptação, tanto às condições nacionais, como as condições do estado do Ceará. Adaptações de aspectos institucionais, tecnológicos e humanos contribuirão para a criação e fortalecimento de uma estrutura financeira e gestão para os painéis em fim de vida (IRENA, 2016), como se pode ressaltar nas sinergias apontadas pelo nexu.

Portanto, o desenvolvimento institucional dos governos é essencial para apoiar práticas para o fim de vida dos painéis fotovoltaicos, tanto para gestão dos resíduos, como para garantia de um planejamento logístico, de um sistema de monitoramento, que esteja baseado em relatórios que cubram as atividades do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos. Tudo isto constitui-se em atividade essencial e devem ser incluídos em regulamentos da federação, estaduais e municipais.

Com isto, mais uma vez a atenção com dados de um monitoramento regional e regulações deixa claro a necessidade de atuação governamental. A problemática dos resíduos extrapola as questões mercadológicas, que se movem pelo dinheiro, muitas vezes prescrevendo a necessidade de valores socioambientais para sua atuação.

Neste intuito, para a gestão dos resíduos fotovoltaicos, é indispensável a integração de diferentes partes interessadas, como fornecedores dos painéis fotovoltaicos, consumidores, e setor de resíduos. Isto posto, como resultado das análises de interações do nexu, a educação e treinamento tem papel fundamental, como também, o desenvolvimento de tecnologias pode criar processos de reciclagem de alto valor para materiais raros, valiosos e potencialmente perigosos que superam os requisitos legais e fornecerão proteção ambiental esperada, além de benefícios socioeconômicos.

Neste contexto, o desenvolvimento de indústrias de reciclagem de painéis fotovoltaicos contribuirá para a economia local, causando a reversão de status de desastre ambiental previsot, se o governo estadual se antecipar, para a condição de criação de valor de mercado, fortalecendo a capacidade domestica do Ceará diante da estruturação da indústria de reciclagem. Mais uma vez, para isto, a criação de uma indústria sólida de reciclagem fotovoltaica, um dos passos essenciais e a confiabilidade da projeção do fornecimento de fluxos de resíduos locais. A confiabilidade destes dados, com as quantidades, qualidade dos resíduos fotovoltaicos, projetando a demanda, orientará, não só o mercado de reciclagem, mais também o mercado de painéis secundários e de reparo, como a extração de matéria-prima, que pode ter a demanda reduzida devido a recuperação na reciclagem.

Contudo, vale ressaltar que no Brasil não se consolidou a logística reversa para equipamentos eletrônicos cotidianos, tão menos pode-se crer na estruturação de uma

cadeia de reciclagem para os resíduos fotovoltaicos, que fundamentalmente se coloca para planejamento agora, para contribuir com a prevenção de problemas futuros. Ou seja, assistimos ao descumprimento de normas reguladoras sobre os procedimentos de descarte e recuperação dos produtos eletroeletrônicos e a insuficiência de informações e de orientação ao consumidor, principalmente sobre o correto descarte dos produtos após o término de sua vida útil. Enfim, se as orientações para descarte permanecerem com a mesma ineficiência, os resíduos solares são um problema futuro anunciado agora.

No entanto, o PNRS prevê a elaboração e a atualização periódica não só de um Plano Nacional, mas também de Planos Estaduais Resíduos Sólidos. Alguns estados têm leis que instituem Políticas Estaduais de Resíduos Sólidos e, por vezes, leis específicas para certos resíduos, inclusive eletroeletrônicos, o que permitiria um planejamento local para a futura demanda de resíduos solares.

Importante ressaltar que, diante dos instrumentos dispostos pela Lei Nacional Dos Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305), está o mecanismo de Logística Reversa, que é definida como 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. Fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes têm a obrigação de criar e manter um sistema de retorno desses produtos, incluindo coleta, armazenamento, transporte e disposição final ambientalmente adequada, contudo, sem a classificação legal pertinente para os painéis fotovoltaicos, estes resíduos ficam a margem da legislação. Ainda mais, ao nos referirmos aos painéis fotovoltaicos estar-se-á referindo a materiais originários de outras nacionalidades, quando, no consumo, houve a transferência de um passivo ambiental. Portanto, sem a devida adequação legal, fica indisponível a articulação entre diferentes setores envolvidos na cadeia produtiva fotovoltaica, como, por exemplo, contratos firmados entre poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes para traçar metas e ações exequíveis para a reciclagem ou descarte adequado.

Novamente, para que se efetive a responsabilidade sobre a reciclagem e os resíduos, é indispensável uma gestão financeira sofisticada, baseada em densa estatística de dados sólidos, que projete as necessidades futuras, já que um ano de grande fluxo de resíduos, que foram colocados no mercado há 30 anos, pode gerar a necessidade de um pico de arrecadação, pico capaz de inviabilizar a operação dos produtores.

Todavia, por exemplo, vale lembrar o caso japonês: avaliando-se a forma tardia que o Japão compôs sua legislação específica para os resíduos fotovoltaicos não corresponde a nenhum descaso. Trata-se de uma sólida estrutura de reciclagem, ampara por marcos legais e até culturais, que automatizou a reciclagem destes novos materiais da geração de energia fotovoltaica. Contudo, já se encontram em andamento roteiros de reciclagem específicos, como dito anteriormente. No mais, o exemplo japonês corrobora a conclusão sobre as necessidades de o Brasil desenvolver, na prática, sua política de resíduos sólidos e uma educação ambiental ampla e popular.

Todo este contexto aponta para a necessidade fundamental de solidificar a logística para reciclagem em um sistema nacional, que a despesas dos lugares com

instalações de sistemas fotovoltaicos mais inóspitos possam ser compensados pelos custos mais amenos dos sistemas maiores e mais centralizados.

Agora, paralelo a discussão sobre reciclagem existe uma questão de utilidade dos sistemas fotovoltaicos diante dos fins de destino de sua utilização. Assim, pode-se imaginar, dependendo da função que se destine a geração de energia fotovoltaica, pode haver uma aplicação, ou mesmo o acréscimo de algum equipamento que surja com as pesquisas atuais, que transforme os módulos com eficiência insuficiente em equipamentos adequados para alguma aplicação secundária. Melhor esclarecendo, avaliando-se que uma placa perde, em média, menos de 1%, da sua eficiência por ano, é notório de se esperar que sistemas ainda operantes possam não mais atender a demanda de produção energética para que foram projetados, no entanto, ainda podem atender ao dimensionamento de projeto de outro lugar ou aplicação. Esta lógica abre a perspectiva de um novo mercado, um mercado de negociação da eficiência de placas, relacionando por exemplo, disponibilidade de telhado e eficiência demandada, assim, a quantidade de placas de um telhado pode não mais atender a demanda do lugar, mas pode se enquadrar no dimensionamento de outro projeto, de outro espaço.

Um conceito, após toda a leitura chega à discussão, corroborando toda a perspectiva que apresentou a revisão bibliográfica, que é o conceito de flexibilidade tropical, do geógrafo Milton Santos. Diante de uma perspectiva da sobrevivência, de manutenção da vida, é possível repensar o cotidiano e criar formas novas de sobrevivência diante da falta de recursos (Santos, 2011). A população passa a criar mecanismos de sobrevivência que podem corresponder, no contexto tratado aqui, a novos usos das placas fotovoltaicas, novos mercados, sejam de usados, seja de reparo, que atenuem a disposição dos resíduos, prolongando a utilidade dos equipamentos, dilatando seu tempo de vida útil, ou mesmo novos usos diferentes ao que projetado inicialmente, até mesmo criando seus modos de reciclagem e reaproveitamento.

Desta forma, antes da reciclagem, não se pode desprezar o mercado de reparos. Os objetos solares quebrados não se tornam imediatamente resíduo elétrico ou eletrônico. Pelo contrário, quando os produtos solares param de funcionar revela-se uma gama de atividades social, cultural e econômica em torno do descarte, armazenamento, recuperação, reparo e retrabalho (Gregson N., 2011). No Quênia, por exemplo, sistemas solares defeituosos se juntam a um mundo inteiro de bens de consumo quebrados, para os quais existem mercado. Este novo mercado está se adaptando a realidade dos usos dos materiais solares, fora do fornecimento logístico robusto de peças de reposição, adequando-se à produção de energia solar fora da rede indústria; absorvendo materiais, componentes e mão de obra (Cross J., Murray D., 2018).

A partir deste contexto, da necessidade de reciclagem, para a realidade brasileira, temos que, não basta responsabilizar o produtor, que por sua vez costumeiramente repassa os custos da logística reversa e da reciclagem ao consumidor. Assim, o que se mostra mais coerente com a lógica de mercado e a necessidade promover as energias renováveis, por causa da questão ambiental, é incentivar a iniciativa privada para a implantação de serviços de coleta e reciclagem, ao mesmo tempo que estabelece forte fiscalização. Com isto, um modelo de gestão de resíduos deve ser costurado por meio de uma trama política institucionalizada pelos governos. A pretensão é que, tanto produtores quanto consumidores,

compartilhem a responsabilidade sobre a destinação mais adequada, mas sem que isso se torne uma penalidade. Penalidade que não irá contribuir para o amadurecimento da urgente causa ambiental, que está na origem da transição para as energias renováveis. Todo o sistema financeiro, ávido por lucro, pode ser colocado a serviço da reciclagem dos painéis fotovoltaicos e das necessidades circundantes para sua realização. Tudo isto, desde que, previsto em legislação elaborada e reconhecida, claramente definida, e com consequências rígidas para o descumprimento, como no caso da união europeia, que se destaca com a implementação do seu modelo de gestão, como visto. Historicamente, o que temos é o amadurecimento da União Europeia, em relação a destinação dos resíduos comuns, bem anterior a infância que vive o país e o estado do Ceará nesta temática. Portanto, projetar o volume de resíduos solares que encontraremos nas próximas décadas aponta para a exigência de amadurecimento acelerado do nosso sistema de gestão de resíduos, não apenas eletrônicos.

No tocante a experiência cearense, vislumbrando um paralelismo com outras experiências internacionais, temos o desenvolvimento dos Ecopontos: que são equipamentos voltadas à gestão responsável de resíduos sólidos na Capital, e contam com caçambas para coleta, estrutura administrativa de trabalho para as equipes de limpeza urbana, fiscalização e monitoramento. Os Ecopontos são adequados para o descarte correto de pequenas proporções de entulho, restos de poda, móveis e estofados velhos, além de óleo de cozinha, papelão, plásticos, vidros e metais. Portanto, estes espaços, dos Ecopontos, podem ser utilizados como partida para a logística reversa das placas fotovoltaicas oriundas da Geração Distribuída. Esta proposta corrobora com a experiência bem sucedida na União Europeia dos Ciclos Fotovoltaicos, em que uma associação dos principais fabricantes de painéis fotovoltaicos, financiada pelas empresas membros, disponibilizam pontos de coleta para o usuário final, sem custos adicionais. Segundo a prefeitura de Fortaleza, atualmente são 90 Ecopontos espalhados pela cidade (<https://catalogodeservicos.fortaleza.ce.gov.br/categoria/urbanismo-meio-ambiente/servico/324>, acesso em 02/08/2021). Uma parceria público/privado poderia estruturar a logística reversa para Geração Distribuída.

Doutra forma, em se tratando da Geração Centralizada, que demonstrou grande capacidade de fornecimento de resíduos solares, mais que o dobro da Geração Distribuída, a logística para reciclagem deve resguardar uma estrutura anexo as usinas de geração. Notadamente, a forma abrupta de colocação de resíduos, devido a longa vida útil dos equipamentos, remete ao momento de viabilidade econômica do mercado de reciclagem diante dos volumes requeridos. Desta forma, vale relembrar Mathur, D. et. al. (2020), que aponta a necessidade na ordem de 20.000 toneladas de resíduos fotovoltaicos para viabilizar um mercado de reciclagem. Assim, diante da perspectiva de geração de fotovoltaicos no Ceará, coerente com os dados apresentados no gráfico 29, Resíduos Geração Centralizadas x Geração Distribuída, na página 80, somente por volta do ano 2050 ter-se-ia um volume adequado para o desenvolvimento de uma indústria de reciclagem de materiais fotovoltaicos, o que ainda exigiria um armazenamento do material, disposto através de perda precoce, por décadas.

Contudo, tem-se que lembrar que o descarte é a última fase do ciclo de vida, é quando o inconveniente definitivo é instalado. Por isso, a reciclagem é a rota que merece todo planejamento e estruturação. Portanto, a reciclagem não só reduz resíduos e emissões relacionadas, mas também oferece o potencial para reduzir o uso de energia e as emissões da produção de material virgem.

7) Conclusões e recomendações

À medida que os humanos usam sua capacidade para conter as forças da natureza e submeter o ecossistema à suas necessidades e seus caprichos, podem causar cada vez mais efeitos colaterais imprevistos e perigosos (Harari, 2018). Repensar nossas práticas e usos dos sistemas naturais é urgente. Temos que 20% da humanidade consome 80% das reservas naturais (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006). Neste contexto, as energias renováveis se concretizariam mais democráticas, no sentido que uma geração de energia renovável também significa a ampliação do acesso ao consumo de eletricidade? Com as energias renováveis estamos caminhando para um paraíso tecnológico de convívio com os ecossistemas ou apenas modificando o modus operandi da nossa geração elétrica e permanecemos no caminho para o completo desastre ambiental? Seria possível reduzir o entusiasmo das sociedades pelo consumo crescente de energia e de recursos naturais? Quando a oferta superar a demanda de energia, haverá paz entre a lógica incansável de geração de riqueza e a exploração ambiental?

Por estranho que pareça começar um parágrafo de conclusão com perguntas, este é um espaço da ciência, que tem seu início na dúvida e segue na busca por resposta. Isto é o que está posto neste trabalho de dissertação. Fez-se apontamentos sobre como lidar com os resíduos das placas fotovoltaicas, seus volumes dispostos no tempo e a viabilidade econômica de uma indústria de reciclagem. Portanto, enquanto se vislumbrarem cenários incertos e possibilidades desastrosas, cabe dúvida.

Tem-se que: A miséria, ao lado do aquecimento global, são as maiores ameaças ao futuro da humanidade (Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric, 2006). Se, as energias renováveis contribuem para frear o aquecimento do planeta, como diminuir as disparidades de riqueza? Talvez seja este um dos grandes serviços que possa prestar as energias renováveis, além da técnica ambientalmente mais adequada de produzir energia, refletir positivamente sobre o grau de civilidade alcançado diante da presença terrível das desigualdades tão profundadas nas sociedades. Neste dia, de uma sociedade mais justa e ambientalmente ajustada, teremos financiamentos acessíveis, não apenas para bens como carros, mas para micro geração de energia renovável? Carros são a prova da ineficiência dos governos em proporcionar transporte público, aliada a eficiência do setor de marketing de promover a crença no fetichismo do objeto. Um microssistema de geração de energia fotovoltaica, como política pública de diminuição da desigualdade é um avanço da civilidade, principalmente se sabido a destinação adequada dos resíduos.

Mas, para saber do destino dos resíduos, em vez de considerar os problemas de gestão dos resíduos solares através da lente de uma cadeia de suprimentos simples, deve ser concebida como um sistema interligado, com responsabilidade do gerenciamento compartilhado entre os governos, indústria e consumidores (Mathur, D. et. al., 2020).

Não há nada inerentemente "limpo" em tecnologias limpas, pelo contrário, o acoplamento da inovação de baixo carbono com a busca de novos locais de acumulação estão produzindo novas formas de injustiça social e ambiental (Newell, P. et. al., 2013). Quadros atuais da justiça distributiva na indústria solar, fora da rede, falha em abordar a política do trabalho na mineração, fornecimento, montagem e

fabricação (Mulvaney, D., 2014). Projetos de energia renovável e infraestrutura começaram a revelar a reprodução e reformulação de relações históricas de poder em transições de baixo carbono, como no caso dos biocombustíveis e a aquisição de terras (Borras Jr. S.M. et. al., 2010).

A justiça energética não é apenas a distribuição do acesso à energia e eletrodomésticos, mas também está no desperdício e reparo, no acesso a peças e conhecimento de projeto. Para que ocorra a transição para energia renovável, de forma socialmente justa e ambientalmente sustentável, a indústria deve assumir novos compromissos com design, sustentabilidade e garantir a logística de peças de reposição e componentes, bem como produtos (Cross, J.; Murray, D., 2018).

Diante de todo contexto tratado ao longo do texto posto aqui, o estado do Ceará encontra uma possibilidade de grande oportunidade ambiental, podendo planejar e estruturar uma indústria de reparo e reciclagem fotovoltaicos, que terá sólida matéria por volta do ano 2050. Oportunidade que se vislumbra agora, mesmo quando o problema dos resíduos é distante e incipiente. Nesta oportunidade, o Ceará pode vigorar como referência para a gestão dentro de suas fronteiras, como também nacional e até internacional para a indústria de reciclagem solar fotovoltaica.

Diante das oportunidades que se apresentam para estudo futuros ainda há carência de trabalhos sobre a produção módulos fotovoltaico a partir de materiais reciclados; dos processos de incineração dos materiais fotovoltaicos; do desenvolvimento de novos materiais para os painéis solares, com destaque para a perovskitas (PSCs); e, também qual caminho tomar orientado por um maior valor econômico, da recuperação dos materiais mais comuns da confecção dos módulos fotovoltaicos ou da recuperação dos materiais mais raros? Por fim, realização de testes de lixiviação e solubilização para classificar os resíduos de painéis fotovoltaicos em perigosos ou não.

8) Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota Técnica N° 0056/2017–SRD/ANEEL – Processo nº: 48500.004924/2010-51. Brasília, 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 687, De 24 De Novembro De 2015.

ALENCAR FILHO, A. et al. Influência da distância de painéis fotovoltaicos em relação à água sobre a eficiência energética. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 2018.

Almeida, Diego Andrade. Potencial de geração de energia solar no Ceará: zoneamento para exploração de energia solar concentrada (CSP) e fotovoltaica (PV) através da integração entre Sistemas de Informações Geográficas e Análise Multicritério, dissertação (mestrado em energias renováveis). IFCE, campus Maracanaú, 2018.

Alting, Leo. Life Cycle Engineering and Design. CIRP Annals, Volume 44, Issue 2, Pages 569-580, 1995.

Aman, M.M., Solangi, K.H., Hossain, M.S., Badarudin, A., Jasmon, G.B., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A., Kazi, S.N. A review of safety, health and environmental (SHE) issues of solar energy system. Renew. Sustainable Energy Rev. 41, 1190–1204, 2015.

Ardente, Fulvio, Latunussa, Cynthia E.L., Blengini, Gian Andrea. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Waste Management 91, 156–167, 2019.

Arjun Appadurai (Ed.), The Social Life of Things: Commodities in Cultural Perspective, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

Aryan, V., Font-Brucart, M., Maga, D. A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets. Prog. Photovolt. Res. Appl. 26, 443–459, 2018.

Ashwani, Lohani. Belezas para fumantes: os motores a vapor do mundo. Nova Deli, Índia: Árvore da Sabedoria, 2004.

Asian Development Bank (ADB). Thinking about Water Differently: Managing the Water-Energy-Food Nexus, ADB, Bangkok, 2013.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee). Panorama Econômico e Desempenho Setorial. São Paulo, 2014.

Atlas Brasileiro de Energia Solar. INPE: São José dos Campos, 2ª ed., 2017.

Baker, H.K.; Ricciardi, V. (Eds.), *Investor Behavior – The Psychology of Financial Planning and Investing*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2014.

Baldé, C.P., et al., *The Global E-waste Monitor – 2014: Quantities, Flows and Resources*, United Nations University, Institute for the Advanced Study of Sustainability, Bonn, <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>, 2015.

Bakhiyi, B., Labreche, F., Zayed, J. The photovoltaic industry on the path to a sustainable future – environmental and occupational health issues. *Environ. Int.* 73, 224–234, 2014.

Barrickman, N. L. *Energetics, Life History, and Human Brain Evolution of Nervous Systems (Second Edition) Volume 4*, Pages 51-62, 2017.

Bekkelund, K. A Comparative Life Cycle Assessment of PV Solar Systems, www.diva-portal.org/smash/get/diva2:654872/FULLTEXT01.pdf, viewed March 2015.

Berger, W., et al. “A Novel Approach for the Recycling of Thin Film Photovoltaic Modules,” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, Nr. 10, pp. 711–18, doi:10.1016/j.resconrec.2009.12.001, 2012.

Blount, W. P. Chapter 36: *Factory Farming—Animal Machines? Intensive Livestock Farming*, Pages, 522-556, 1968.

Bonn2011 Conference. *Messages from the Bonn2011 Conference: The water, energy and food security nexus— solutions for a green economy*, 2011.

Borras Jr. S.M.; McMichael, P.; Scoones, I. The politics of biofuels, land and agrarian change: editors' introduction, *J. Peasant Stud.* 37 (4), 575–592, 2010).

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília: Senado, 1988.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências, 2010.

BRASIL, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

BUTTI, K.; PERLIN, J. *A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology*. 1. ed. Palo Alto, EUA: Chechire Books, 1980.

Butler, Colin D., Higgs, Kerry, McFarlane, Rosemary Anne. *Environmental Health, Planetary Boundaries and Limits to Growth Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*, Pages 533-543, 2019.

Calnan, S. *Application of Oxide Coatings in Photovoltaic Devices and Coatings*, 2014, Vol. 4, pp. 162-202, doi: 10.3390/coatings4010162, www.mdpi.com/2079-6412/4/1/162, 2014.

Carrington, Gerry; Stephenson Janet. The politics of energy scenarios: Are International Energy Agency and other conservative projections hampering the renewable energy transition? *Energy Research & Social Science* 46, 103–113, 2018.

Carvalho, P.; Mesquita, P.; Rocio, M. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? *BNDES Setorial*, v. 40, p. 205–234, 2014.

Cheng, Z.X., Wang, X.L. The expatriates of the solar energy photovoltaic panel. *J. Inf. Rec. Mater.* 8, 41–47, 2007.

Choi, J.K., Fthenakis, V. Design and optimization of photovoltaics recycling infrastructure. *Environ. Sci. Technol.* 44, 8678–8683, 2010.

Choi, J.K., Fthenakis, V. Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives. *J. Clean. Prod.* 66, 443–449, 2014.

Christensen, J. and Olhoff, A. Lessons from a decade of emissions gap assessments. United Nations Environment Programme, Nairobi, 2019.

Christian, David. Maps of time, 2004. APUD Harari, Yurval Noah. *Sapiens: Uma breve história da Humanidade*, Tradução Janaína Marcoantonio, Porto Alegre: L&PM, 2018.

Chowdhury, Md. Shahariar; Rahman, Kazi Sajedur; Chowdhury, Tanjia; Nuthammachot, Narissara; Techato, Kuaanan; Md. Akhtaruzzaman; Tiong, Sieh Kiong; Sopian, Kamaruzzaman; Amin, Nowshad. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews* 27, 100431, 2020.

Corcelli, F., Ripa, M., Leccisi, E., Cigolotti, V., Fiandra, V., Graditi, G., Sannino, L., Tammaro, M., Ulgiati, S. Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life. *Ecol. Indic.* 94 (3), 37–51, 2018.

Cross, Jamie; Murray, Declan. The afterlives of solar power: Waste and repair off the grid in Kenya. *Energy Research & Social Science* 44, 100–109, 2018.

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Rosa, P. End-of-life of used photovoltaic modules: a financial analysis. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 47, 552–561, 2015.

CU-PV, CU-PV - Sustainable PV - Cradle-to-Cradle Sustainable PV Modules, Energy Research Centre of the Netherlands and PV CYCLE, www.sustainablepv.eu/cu-pv/, viewed May 2016, 2016.

D'Adamo, I., Miliacca, M., Rosa, P. Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules. *Int. J. Photoenergy* 6, pages. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>, 2017.

Deaton. Angus. *A Grande Saída: Saúde, Riqueza e as Origens da Desigualdade*. Intrínseca: Rio de Janeiro, 2017.

Declaração do Rio de Janeiro (Rio/92). Revista Estudos Avançados, 1992.

Deng R, Chang NL, Ouyang Z, Chong CM. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. Renewable and Sustainable Energy Reviews.; 109:532-50, 2019.

Deutz, Pauline. Encyclopedia Circular Economy: International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition), Pages 193-201, 2020.

Doerfler, R. L., Peters, K. J. The relativity of ethical issues in animal agriculture related to different cultures and production conditions. Livestock Science Volume 103, Issue 3, September, Pages 3 September 2006 Pages 257-262, 2006 EPE, 2016.

ElektroG. Bundesgesetzblatt (German Parliament Official Journal) BGBl I S.762, March, www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog.pdf (viewed March 2016), 2005.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Nota Técnica DEA 19/14 – Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro, outubro/2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Rio de Janeiro, 2017. Available: Série Recursos Energéticos: Nota Técnica DEA 19/14 – Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro, 2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050. Série ESTUDOS DE LONGO PRAZO NOTA TÉCNICA PR 07/18. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050: NOTA TÉCNICA PR 04/18. Série RECURSOS ENERGÉTICOS. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). BEN- Séries históricas completas. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: julho de 2020.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Global Market Outlook 2013-2017. Bruxelas (Bélgica), 2013.

Erdmann, L., S. Behrendt and M. Feil, Kritische Rohstoffe für Deutschland (Critical Raw Materials for Germany), www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf, 2011.

Europäischer Wirtschaftsdienst. Stock Market Prices for First and Secondary Raw Materials, Europäischer Wirtschaftsdienst, Recycling und Entsorgung, Gernsbach, Germany, 2016.

European Commission (EC), 2018. Commission Staff Working Document - Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. SWD, 36 final, 2018.

European Commission. Mandate to the European Standardisation Organisations for Standardisation in the Field of Waste Electrical and Electronic Equipment (Directive 2012/19/ EU) (M/518 EN), European Commission, Brussels, Belgium, 2013.

European Parliament and Council. Directive 2012/19/ EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), EU, Brussels, http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis_en.htm (viewed November 2015), 2012.

European Committee for Electrotechnical Standardization CLC/TC 111X. Collection, Logistics & Treatment Requirements for WEEE - Part 2-4: Specific Requirements for the Treatment of Photovoltaic Panels, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:1509447067868501:::FSP_ORG_ID,FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:1258637,59265,25 (viewed July 2015), 2015.

FECOMERCIO SP. Resíduos Sólidos – Logística Reversa: O que o empresário do comércio e serviços precisa saber e fazer. São Paulo, 2014.

Ficha técnica CANADIAN SOLAR BRASIL. https://canadiansolar.com.br/la/wp-content/uploads/2020/03/PT_CanadianSolar_KuMax_CS3UP_v5.6_F16_J2.pdf, acesso em 15/02/2021.

Fórum Econômico Mundial (2011). Water Security: The Water-Nexus Alimentos-Energia-Clima, Fórum Econômico Mundial, Washington DC, 2011.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. Photovoltaics report. Freiburg: Fraunhofer ISE, mar. 2019. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/>>. Acesso em: setembro de 2019.

GAGO, Marília. O olhar dos alunos acerca da variância da narrativa histórica. UFPR, 2003.

Giacchetta, G., M. Leporini and B. Marchetti. "Evaluation of the Environmental Benefits of New High Value Process for the Management of the End of Life of Thin-film Photovoltaic Modules," Journal of Cleaner Production Vol. 51, pp. 214–24, doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.022, 2013.

Giorgi, G.; Yamashita, K.; J. Mater. Chem. A, 3, 8981, 2015.

Girão, V. C. As oficinas ou charqueadas no Ceará. Fortaleza: Secretaria de Cultura e Desporto, 1984.

Government of India. Jawaharlal Nehru National Solar Mission - Resolution No.5/14/2008-P&C, Ministry of New and Renewable Energy, New Delhi, www.mnre.gov.in/solar-mission/jnnsmission/resolution-2/ (viewed May 2016), 2011.

Grassi, Alessandro; Delogu, Massimo; Baldanzini, Niccolò; Berzi, Lorenzo; Pierini, Marco. Structural analysis of a mobile device for the end-of-life treatment of photovoltaic panels. *Structural Integrity Procedia* 8, 594-603, 2018.

Grayson, Donald K.; Meltzer, David J. Revisiting Paleoindian exploitation of extinct North American mammals. *Journal of Archaeological Science*, Volume 56, April 56 April, Pages 177-193, 2015.

Greener, Estudo Estratégico Geração Distribuída Mercado Fotovoltaico. 1º Semestre de 2020, Brasil.

Gregson N. *Living with Things: Ridding, Accommodation, Dwelling*, first paperback edition, Sean Kingston Publishing, Wantage, 2011.

Hansena J.P., Narbelb P.A., Aksnesc D.L. Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 769–774, 2017.

Harari, Yuval Noah. *Sapiens: Uma breve história da Humanidade*, Tradução Janaína Marcoantonio, Porto Alegre: L&PM, 2018.

Herculano-Houzel, Suzana. Chapter 8: Life history changes accompany increased numbers of cortical neurons: A new framework for understanding human brain evolution *Progress in Brain Research*, Volume 250, Pages 179-216, 2019.

Hindle, Brooke e Steven Lubar. *Motores de mudança*. Washington: Smithsonian Institution Press, 1986.

Huberman, Leo. *História da Riqueza do Homem: Do Feudalismo ao Século XXI*. LTC: Rio de Janeiro. 22ª edição, 2010.

Hupffer, H. M.; Engelmann, W. O princípio responsabilidade de H. Jonas como contraponto ao avanço (ir)responsável das nanotecnologias. **Rev. Direito Práx.**, Rio de Janeiro, Vol. 08, N. 04, p. 2658-2687, 2017.

Hwai-Em Tseng; Chien-Chen Chang; Jia-Diann Li. Modular design to support green life-cycle engineering. **Expert Systems with Applications**. Volume 34, Issue 4, Pages 2524-2537, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). IPECE DATA - Sistema de Informações Geossocioeconômicas do Ceará. 2019. Disponível em: <<http://ipecece.data.ipece.ce.gov.br/>>. Acesso em: junho de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Solar Energy Perspectives 2011*. Organization for Economic Cooperation & Development, Paris, 2011.

IEA, capacidade instalada de geração de energia por fonte no cenário de políticas declaradas, 2000-2040, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-no-políticas-declaradas-cenário-2000-2040>

IEA, Geração de eletricidade por fonte, OCDE, 1990-2018, AIE, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-generation-by-source-oecd-1990-2018>

IEA, geração de energia solar fotovoltaica no cenário de desenvolvimento sustentável, 2000-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-generation-in-the-sustainable-desenvolvimento-cenário-2000-2030>

International Energy Agency (IEA, 2015). World Energy Outlook 2015. Paris. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015.pdf>.

International Energy Agency (IEA, 2016). World Energy Outlook 2016. Paris. <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2016>.

International Energy Agency (IEA, 2018). Statistics. <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=TPESbySource&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=BALANCES&showDataTable=false> (Accessed: 17 August 2018).

IRENA (2016b), Renewable Energy Capacity Statistics 2015, IRENA, Abu Dhabi

International Renewable Energy Agency (IRENA, 2015). Renewable Power Generation Costs in 2014. Abu Dhabi. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf.

International Renewable Energy Agency (IRENA). END-OF-LIFE MANAGEMENT: SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS, 2016.

IRENA. Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2017.

Jawaharlal Nehru National Solar Mission - Resolution No.5/14/2008-P&C, Ministry of New and Renewable Energy, New Delhi, www.mnre.gov.in/solar-mission/jnnsr/resolution-2/ (viewed May 2016), 2011.

Jimenez-Millan, Juan, Abad, Isabel, Jimenez-Espinosa, Rosario, Yebra-Rodriguez, Africa. Assessment of solar panel waste glass in the manufacture of sepiolite based clay bricks. Materials Letters 218, 346–348, 2018.

JONAS, Hans. O Princípio Responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica. Trad. Marijane Lisboa & Luis Barros Montez. Rio de Janeiro: Contraponto EDPUC-RJ, 2006.

J.Y. Zhu, A. Deshmukh. Application of Bayesian decision networks to life cycle engineering in Green design and manufacturing. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. V. 16, p. 91–103, 2003.

Kang, S., et al. "Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules," *Renewable Energy*, Vol. 47, pp. 152–159, doi:10.1016/j.renene.2012.04.030, 2012.

Karneyeva Y.; Wüstenhagen R. Solar feed-in tariffs in a post-grid parity world: the role of risk, investor diversity and business models, *Energy Policy* 106, 445–456, 2017.

Kim, Y. and J. Lee. "Dissolution of Ethylene Vinyl Acetate in Crystalline Silicon PV Modules Using Ultrasonic Irradiation and Organic Solvent," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 98, pp. 317–322, doi:10.1016/j.solmat.2011.11.022, 2012.

Klugmann-Radziemska, E., Ostrowski, P. Chemical treatment of crystalline silicon solar panels as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy* 38, 1751–1759, 2010.

Komoto, K. "Developments on PV Recycling in Japan," *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, 2014.

K. Komoto, J.S. Lee, J. Zhang, D. Ravikumar, P. Sinha, A. Wade, G. Heath, *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12, 2018.

KRYZA, F. *The power of light: the epic story of man's quest to harness the sun*. New York: McGraw Hill, 2003.

Kuzawa, CW, Chugani, HT, Grossman, LI, Lipovich, L., Muzik, O., et al., 2014. Custos metabólicos e implicações evolutivas do desenvolvimento do cérebro humano. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 13010-13015.

LANGE, W. Metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico. Empresa De Pesquisa Energética / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, estudo interno elaborado por meio da TerraGIS. Rio de Janeiro EPE/GIZ, 2012.

LANGE, Wolfram Johannes; VASCONCELOS, Adriano de Oliveira. Refinamento do mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil. Projeto: Energias Renováveis e Eficiência Energética em Cidades (4ES)/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Rio de Janeiro EPE/GIZ, 2015.

Latunussa, C.E.L., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L. Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Sol. Energ. Mat. Sol. C* 156, 101–111, 2016.

Luna, Márcia Andréa Rosas; Cunha, Felipe Barroco Fontes; Mousinho, Maria Cândida Arrais de Miranda; Torres, Ednildo Andrade. Solar Photovoltaic Distributed Generation in Brazil: The Resolution Case 482/2012. *Energy Procedia*, 159, 484-490, 2017.

Lunardi, M.M., Alvarez-Gaitan, J.P., Bilbao, J.I., Corkish, R. The comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules. *Appl. Sci.* 8, 1396, 2018.

Li, Tianqi; Roskilly, Anthony Paul; Wang, Yaodong. A Regional Life Cycle Sustainability Assessment Approach and its Application on Solar Photovoltaic. *Energy Procedia* 105, 3320 – 3325, 2017.

Lima, Mateus de. O princípio responsabilidade de Hans Jonas e a crítica de Karl-Otto Apel. *Seara Filosófica*, 2010.

Magalini, Federico; Sinha-Khetriwal Deepali; Rochat, David; Huismann, Jaco, Munyambu, Seth; Oliech, Joseph; Chidiabsu, Innocent, Mbera, Oliver. Electronic waste (e-waste) impacts and mitigation options in the off-grid renewable energy sector, *Evidence on Demand*, 2016.

Marini, C. et al. “A Prospective Mapping Of Environmental Impacts Of Large Scale Photovoltaic Ground Mounted Systems,” 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, 2014.

Marks, Roberts. *The Origins of the Modern World: A Global and Ecological Narrative from the Fifteenth to the Twenty-first Century*. Rowman & Littlefield Publishers, 2007.

Mathur, Deepika; Gregory, Robin; Simmons, Tristan. *End-of-life Management of Solar PV Panels*, 2020.

Martí-Henneberg, Jordi. European integration and national models for railway networks (1840–2010) *Journal of Transport Geography*. Volume 26, January, Pages 126-138, January, 2013.

Marwede, M. and A. Reller. “Future Recycling Flows of Tellurium from Cadmium Telluride Photovoltaic Waste,” *Journal Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 69, pp. 35-49, 2012.

METI and Ministry of Environment (MOE). *Report on Reuse, Recycling and Proper Treatment of EOL Renewable Energy Equipment*, METI and the MOE, Tokyo, 2015.

METI and MOE. *Guidelines on End-of-Life Management of PV Modules*, METI and MOE, Tokyo, www.env.go.jp/press/files/jp/102441.pdf, 2016.

Miao, X. *Research on the Extended Producer Responsibility of Electronic Waste Recycling*. Huazhong University of Science & Technology, 2015.

Middleton, C., J. Allouche, D. Gyawali, and S. Allen. The rise and implications of the water-energy-food nexus in Southeast Asia through an environmental justice lens, *Water Altern.*, 8(1), 627–654, 2015.

Miles, R.W., Hynes, K.M., Forbes, I. Photovoltaic solar panels: an overview of state-of-the-art panel development and environment issues. *Prog. Cryst. Growth Ch.* 51, 1–42, 2005.

Ministry of Economy, Trading and Industry (METI). 11th New and Renewable Energy Subcommittee under the Committee on Energy Efficiency and Renewable Energy Subcommittee, April 2015, METI, Toyko, 2015.

Mkono, Mucha; Holder, Afiya. The future of animals in tourism recreation: Social media as spaces of collective moral reflexivity Tourism Management Perspectives, Volume 29, January, Pages 1-8, 2019. Perspectives Volume 29 January 2019 Pages 1-8

MME - Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional - Série Completa, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 1970-2015. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompleta.aspx>>. Acesso em maio 2017.

MME - Ministério de Minas e Energia. Demanda de Energia 2050. Nota Técnica DEA 13/15, Empresa de Pesquisa Energética

MME - Ministério de Minas e Energia. NOTA TÉCNICA PR 04/18 Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050. Série RECURSOS ENERGÉTICOS. Rio de Janeiro. 2018

MME - Ministério de Minas e Energia. Nota Técnica Nº5/2017/AEREG/SE– Aprimoramento do Marco Legal do Setor Elétrico. Proc. Nº 48000.001405/2016-67. Secretaria Executiva/Assessoria Especial em Assuntos Regulatórios, Brasília, 2017.

Monier, V., Hestin, M. Study on Photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive. In: Service, B.I. (Ed.), A Project Under the Framework Contract ENV.G.4/FRA/2007/0067, Paris, France, 10, 2011.

Muller, Mike. The Nexus Contribution to Better Water Management and Its Limitations. The American Geophysical Union, 2017.

Mulvaney, D. Are green jobs just jobs? Cadmium narratives in the life cycle of Photovoltaics, Geoforum 54, 178–186, 2014.

Nascimento, R. L. ENERGIA SOLAR NO BRASIL: SITUAÇÃO E PERSPECTIVAS. Câmara dos Deputados. Estudo técnico, 2017.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY -NREL. Best research-cell efficiency chart. 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov>>. Acesso em: julho de 2020.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for March 2020, published online April 2020, retrieved on April 30, 2020 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202003>.

Oliveira, L.S.S.; Yamane, L. H.; Siman R.R. Silver recovery from end-of-life photovoltaic panels. Proceedings SARDINIA, 2019.

Oreski, G. “Encapsulant Materials and Degradation Effects - Requirements for Encapsulants, New Materials and Research Trend,” presentation at IEA Task 13 open workshop, Freiburg, <http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/intranet/task13/>

Workshops/04_Open_Workshop_Task_13_Meeting_Freiburg/Oreski_IEA_Task_13_Workshop.pdf, 2014.

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 2017). Investing in Climate, Investing in Growth. Paris. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264273528-en.pdf?expires=1540967063&id=id&accname=ocid195767&checksum=1570E9A640FBA6E18BC5D2D336A820BC>.

Paiano, A. Photovoltaic waste assessment in Italy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 99–112, 2015.

Pandey, V. P.; Shrestha, S. Evolution of the Nexus as a Policy and Development Discourse. The American Geophysical Union, 2017.

Pearce, J., et al. Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules, www.appropedia.org/Producer_responsibility_and_recycling_solar_photovoltaic_modules, viewed October 2014.

Peeters, J.R., Altamirano, D., Dewulf, W., Duflou, J.R. Forecasting the composition of emerging waste streams with sensitivity analysis: A case study for photovoltaic (PV) panels in Flanders. *Resour. Conserv. Recy.* 120, 14–26, 2017.

Peter Newell, Dustin Mulvaney, The political economy of the “just transition”, *Geogr. J.* 179 (2), 132–140, <http://dx.doi.org/10.1111/geoj.12008>, 2013.

Perez-Santalla, M. Silver Use: Changes & Outlook, www.bullionvault.com/gold-news/silver-use-103020132, 2013.

Perumallapelli, G. R.; Vasa, S. R.; Jang, J.; *Org. Electron.* 31, 142, 2016.

Pillai, U. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics, *Energy Econ.* 50 286–293, 2015.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio (ORGs). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.

PV CYCLE (2015), Solarwaste in the European Union, PV cycle, www.solarwaste.eu/in-your-country, viewed July 2016.

Qu, Y. Study on legal issue of electronic waste in EU. North China Power University, 2015.

Raina, M. K.; Raychaudhuri, S. Mahatma Gandhi 1869–1948. *Encyclopedia of Creativity* (Second Edition). Pages 543-550, 2011.

Raitel. International Technology Roadmap for Photovoltaic - Results 2013, www.itrpv.net/Reports/Downloads, 2014.

Raphaela, Ellen; Silva, Mariana Nascimento; Szostakb, Rodrigo; Schiavona, Marco Antônio; Nogueira, Ana Flávia. CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE. Quim. Nova, Vol. 41, No. 1, 61-74, 2018.

Ramaswamy, N. S. Draught animal welfare. Applied Animal Behaviour Science Volume 59, Issues 1–3, August, Pages 3 August 1998 Pages 73-84, 1998.

Ramaswami, V., et al. "Issues Concerning Use of Antimony in Solar Glass and Development of Antimony-free Low Iron Glass for Solar Applications," Proceedings 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, 2014.

Rathje, William L.; Rubbish, Murphy Cullen. The Archaeology of Garbage, University of Arizona Press, Tucson, 2001.

Reeves, Hubert; Lenoir, Frédéric. Mal da terra. Tradução: Regina Vasconcelos. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

Reichardt, Fernanda Viegas; Santos, Mayara Regina Araújo dos. (In)eficácia do Princípio de Precaução no Brasil. **ESTUDOS AVANÇADOS**. 33 (95), 2019.

REN21. Renewables 2015 - Global Status Report, 2015.

Renewables in Cities 2019, Global Status Report. United Nations Environment Programme (PNUMA), Nairobi, 2019.

Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). RCRA, 42 U.S.C. §6901 et seq. 1976, Environmental Protection Agency, US, 1976.

Rutland, Jonathan. A era do vapor. Nova York: Random House, 1987.

Salam, P. Abdul; Shrestha, Sangam; Pandey, Vishnu Prasad; Anal, Anil Kumar (Editors). Water-Energy-Food Nexus Principles and Practices. The American Geophysical Union, 2017.

Sander, K., et al. Study on the Development of a Takeback and Recovery System for Photovoltaic Modules, European Photovoltaic Industry Association, German Solar Industries Association, Berlin, 2007.

Santos, I. Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura. Tese (Doutorado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Orientador: Ricardo RÜTHER. Florianópolis, 2013.

Santos, Milton. Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal. Rio de Janeiro: BestBolso, 2011.

Schumbert, Camargo. Atlas Eólico e Solar: Ceará. Schumbert Camargo: Curitiba; ADECE, FIEC, SEBRAE: Fortaleza, 2019.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019. 2020.

Sinha, P. and A. Wade. Assessment of Leaching Tests for Evaluating Potential Environmental Impacts of PV Module Field Breakage. IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5/6, pp. 1710-1714, New Orleans, 2015.

Smith, D.E., Harrison, S. and Jordan, J.T. (2011). The early Holocene sea level rise. Quaternary Science Reviews 30(15-16), 1846-1860. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.04.019>.

Statista. Projected cumulative volume of solar photovoltaic panel waste worldwide from 2016 to 2050, 2018. <https://www.statista.com/statistics/565743/solar-pv-panels-waste-projection-worldwide/> (acesso em agosto de 2020).

Stewart R, Salim HK, Sahin O. There's a looming waste crisis from Australia's solar energy boom. 30th July, 2019.

Stiftung Elektroaltgeräte (Used Electronic Equipment Foundation). Stiftung Elektroaltgeräte Register, Stiftung Elektroaltgeräte, www.stiftungear.de/en/ (viewed July 2015), 2015.

Szostak, Rodrigo; Sanchez, Sandy; Marchezi, Paulo E.; Marques, Adriano S.; Silva, Jeann C.; Holanda, Matheus S.; Hagfeldt, Anders; Tolentino, Hélio C. N.; Nogueira Ana F. Revealing the Perovskite Film Formation Using the Gas Quenching Method by In Situ GIWAXS: Morphology, Properties, and Device Performance. Adv. Funct. Mater. 2020.

Taoa, C., J. Jiang and M. Taoa. "Natural Resource Limitations to Terawatt Solar Cell Deployment," ECS Transactions, Vol. 33/17, pp. 3-11, Las Vegas, <http://ecst.ecsdl.org/content/33/17/3.full.pdf>, 2011.

Taylor, P.C., Cai, M., Hu, A., Meehl, J., Washington, W. and Zhang, G.J. (2013). A decomposition of feedback contributions to polar warming amplification. Journal of Climate 26(18), 7023-7043. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00696.1>.

The Silver Institute and Thomson Reuters. World Silver Survey 2014 - a Summary, The Silver Institute, www.silverinstitute.org/site/wp-content/uploads/2011/06/WSS2014Summary.pdf, 2014.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

UN Environment (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi. DOI 10.1017/9781108627146.

United Nations Environment Programme (PNUMA). Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi.

UK Department for Business, Innovation and Skills, WEEE Regulations – Government Guidance Notes, UK Department for Business, Innovation and Skills, London, England.

www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/292632/bis-14-604-weee-regulations-2013-government-guidance-notes.pdf. (viewed March 2016), 2013.

UK Environment Agency. List of Approved Compliance Schemes for WEEE - UK Environment Agency, Bristol, www.sepa.org.uk/media/36439/approved-pcss.pdf. (viewed July 2015), 2015.

United Nations Conference on Trade and Development. Small Island Developing States: Challenges in Transport and Trade Logistics, Note by the UNCTAD secretariat, TD/B/C.I/MEM.7/8, Trade and Development Board, Trade and Development Commission, Multi-Year Expert Meeting on Transport, Trade Logistics and Trade Facilitation, Third session, Geneva, 24–26 November 2014. http://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/cimem7d8_en.pdf (viewed May 2016), 2014.

Ushizima, Mariana Monteiro; Marins, Fernando Augusto Silva; Muniz Jr., Jorge. Política Nacional de Resíduos Sólidos: Cenário da Legislação Brasileira com Foco nos Resíduos Eletroeletrônicos. XI Simpósio De Excelência Gestão E Tecnologia. Rio de Janeiro, 2014.

Villalva, Marcelo Gradella; Gazoli, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica, conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, 2012.

Vogt, K., T. Patel-Weynand, and M. Shelton. Sustainability Unpacked: Food, Energy and Water for Resilient Environments and Societies, Routledge, New York, 2010.

Yan Li, Hailong Li, Ge Wang, Xuefei Liu, Qi Zhang. Study on the optimal deployment for Photovoltaic components recycle in China. Energy Procedia 158, 4298–4303, 2019.

Yan Xu; Jinhui Li; Quanyin Tan; Anesia Lauren Peters; Congren Yang. Global status of recycling waste solar panels: A review. Waste Management, 2018

Yue Wang; Sydney Calhoun; Lisa Bosman; J.W.Sutherland. Tolerance Allocations on Products: A Life Cycle Engineering Perspective. Procedia CIRP. Volume 80, Pages 174-179, 2019.

Wambach, K. Life cycle inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe. Report IEA-PVPS T12-12. http://www.iea-pvps.org/index.php?id=9&elD=dam_frontend_push&docID=4239, 2017 (Acesso, agosto de 2020).

Wang, et al. “Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module,” Photovoltaic Specialists Conference, 2012 38th Institute of Electrical and Electronics Engineers, Austin, Texas, pp. 002355-002358, doi: 10.1109/ PVSC.2012.6318071, 2012.

Weckend, S., Wade, A., Heath, G. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic, Panels.51, 2016.

Wirth, H. Recent Facts about Photovoltaics in Germany, Fraunhofer ISE, Freiburg, www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-undkonzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany. Pdf, viewed February 2016.

Wüstenhagen, R.; Menichetti E. Strategic choices for renewable energy investment: conceptual framework and opportunities for further research, Energy Policy 40, 1–10, 2012.

Zimmermann, T. “Dynamic Material Flow Analysis of Critical Metals Embodied in Thin-film Photovoltaic Cells,” Artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit (Sustainability Research Centre), Artec-paper Nr. 194, Bremen, www.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/single_sites/artec/artec_Dokumente/artec-paper/194_paper.pdf, 2013.

Anexo

Lista de usinas previstas por proprietário				
	Empreendimento	Proprietário/Regime de Exploração	Potência Outorgada (kW)	Município
1	Aratinga 1	100% para Aratinga Geração Solar Energia Ltda. (PIE)	30.000,00	Milagres - CE
2	Aratinga 2	100% para Aratinga Geração Solar Energia Ltda. (PIE)	30.000,00	Milagres - CE
3	Aratinga 3	100% para Aratinga Geração Solar Energia Ltda. (PIE)	30.000,00	Milagres - CE
4	Aratinga 4	100% para Aratinga Geração Solar Energia Ltda. (PIE)	30.000,00	Milagres - CE
5	Aratinga 5	100% para Aratinga Geração Solar Energia Ltda. (PIE)	30.000,00	Milagres - CE
6	Bom Lugar IV	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR IV GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	36.300,00	Icó - CE
7	Bom Lugar IX	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR IX GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	36.300,00	Icó - CE
8	Bom Lugar V	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR V GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	36.300,00	Icó - CE
9	Bom Lugar VI	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR VI GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	35.200,00	Icó - CE
10	Bom Lugar VII	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR VII GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	36.300,00	Icó - CE
11	Bom Lugar VIII	100% para LIGHTSOURCE BOM LUGAR VIII GERACAO DE ENERGIA LTDA (PIE)	36.300,00	Icó - CE
12	Gameleira 1	100% para GAMELEIRA 1 ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	33.000,00	Milagres - CE
13	Gameleira 2	100% para GAMELEIRA 2 ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	33.000,00	Milagres - CE
14	Gameleira 3	100% para GAMELEIRA 3 ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	33.000,00	Milagres - CE
15	Gameleira 4	100% para GAMELEIRA 4 ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	33.000,00	Milagres - CE
16	Lavras 1	100% para LAVRAS 1 SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	27.000,00	Caucaia - CE
17	Lavras 2	100% para LAVRAS 2 SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	27.000,00	Caucaia - CE
18	Lavras 3	100% para LAVRAS 3 SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	27.000,00	Caucaia - CE
19	Lavras 4	100% para LAVRAS 4 SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	27.000,00	Caucaia - CE
20	Lavras 5	100% para LAVRAS 5 SOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	27.000,00	Caucaia - CE

21	Lavras 6	100% para LAVRAS 6 ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	26.000,00	Caucaia - CE
22	Lavras 7	100% para LAVRAS 7 ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	20.000,00	Caucaia - CE
23	Lavras 8	100% para Lavras 8 Energias Renováveis S.A. (PIE)	20.000,00	Caucaia - CE
24	Mauriti 1	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 10 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA. (PIE)	49.110,00	Mauriti - CE
25	Mauriti 2	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 2 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA (PIE)	24.555,00	Mauriti - CE
26	Mauriti 3	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 3 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA (PIE)	49.110,00	Mauriti - CE
27	Mauriti 4	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 4 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA (PIE)	49.110,00	Mauriti - CE
28	Mauriti 5	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 5 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA (PIE)	49.110,00	Mauriti - CE
29	Mauriti 6	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 6 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA (PIE)	49.110,00	Mauriti - CE
30	Mauriti 7	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 7 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA. (PIE)	14.733,00	Mauriti - CE
31	Mauriti 8	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 8 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA. (PIE)	49.110,00	Milagres - CE
32	Mauriti 9	100% para SUNCO ENERGY BRASIL MAURITI 9 PARTICIPAÇÕES SOCIETÁRIAS LTDA. (PIE)	9.822,00	Milagres - CE
33	Milagres I	100% para LIGHTSOURCE MILAGRES I GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA (PIE)	32.740,00	Abaiara - CE
34	Milagres II	100% para LIGHTSOURCE MILAGRES II GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA (PIE)	32.740,00	Abaiara - CE
35	Milagres III	100% para LIGHTSOURCE MILAGRES III GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA (PIE)	32.740,00	Abaiara - CE
36	Milagres IV	100% para LIGHTSOURCE MILAGRES IV GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA (PIE)	32.740,00	Abaiara - CE
37	Milagres V	100% para LIGHTSOURCE MILAGRES V GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA (PIE)	32.740,00	Abaiara - CE
38	Morada do Sol 1	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	50.000,00	Aquiraz - CE
39	Morada do Sol 2	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	50.000,00	Aquiraz - CE
40	Morada do Sol 3	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	50.000,00	Aquiraz - CE

41	Morada do Sol 4	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	50.000,00	Aquiraz - CE
42	Morada do Sol 5	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	50.000,00	Aquiraz - CE
43	Morada do Sol 6	100% para Complexo Solar Fotovoltaico Morada do Sol Ltda. (PIE)	37.500,00	Aquiraz - CE
44	Mundo Novo I	100% para Usina Geradora de Energia SGA Ltda. (PIE)	44.000,00	São Gonçalo do Amarante - CE
45	Mundo Novo II	100% para Usina Geradora de Energia SGA Ltda. (PIE)	46.000,00	São Gonçalo do Amarante - CE
46	Mundo Novo III	100% para Usina Geradora de Energia SGA Ltda. (PIE)	46.000,00	São Gonçalo do Amarante - CE
47	Mundo Novo IV	100% para Usina Geradora de Energia SGA Ltda. (PIE)	46.000,00	São Gonçalo do Amarante - CE
48	Pitombeira	100% para ALUPAR INVESTIMENTO S.A. (PIE)	47.250,00	Aracati - CE
49	Serra do Mato III	100% para SERRA DO MATO III ENERGIA SOLAR S.A. (PIE)	47.292,00	Trairi - CE
50	Serra do Mato IV	100% para SERRA DO MATO IV ENERGIA SOLAR S.A. (PIE)	54.048,00	Trairi - CE
51	Sertão Solar Barreiras V	100% para SOLAR DO SERTÃO V ENERGIA SPE LTDA (PIE)	27.496,00	Limoeiro do Norte - CE
52	Sobral I	100% para UFV - USINA FOTOVOLTAICA SOBRAL I SPE LTDA (PIE)	90.000,00	Sobral - CE

Fonte: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021.

Lista de usinas em construção por proprietário				
	Empreendimento	Proprietário/Regime de Exploração	Potência Outorgada (kW)	Município
1	Alex I	100% para Alex I Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Limoeiro do Norte - CE
2	Alex III	100% para Alex III Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Limoeiro do Norte - CE
3	Alex IV	100% para Alex IV Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Tabuleiro do Norte - CE
4	Alex IX	100% para Alex IX Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Limoeiro do Norte - CE
5	Alex V	100% para Alex V Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Limoeiro do Norte - CE
6	Alex VI	100% para Alex VI Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Tabuleiro do Norte - CE
7	Alex VII	100% para Alex VII Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Limoeiro do Norte - CE

8	Alex VIII	100% para Alex VIII Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Tabuleiro do Norte - CE
9	Alex X	100% para Alex X Energia SPE S.A. (PIE)	30.933,00	Tabuleiro do Norte - CE

Fonte: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021.

Lista de usinas em operação por proprietário				
	Empreendimento	Entrada em Operação	Proprietário/Regime de Exploração	Potência Outorgada (kW)
1	Tauá	01/07/2011	100% para TAUÁ GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA. (REG)	5.000,00
2	Apodi I	28/11/2018	100% para APODI I ENERGIA SPE S/A (PIE)	33.000,00
3	Apodi II	28/11/2018	100% para APODI II ENERGIA SPE S/A (PIE)	33.000,00
4	Apodi III	28/11/2018	100% para APODI III ENERGIA SPE S/A (PIE)	33.000,00
5	Apodi IV	28/11/2018	100% para APODI IV ENERGIA SPE S/A (PIE)	33.000,00
6	Sol do Futuro I	02/03/2019	100% para CENTRAL FOTOVOLTAICA SOL DO FUTURO I S.A. (PIE)	27.000,00
7	Sol do Futuro II	02/03/2019	100% para CENTRAL FOTOVOLTAICA SOL DO FUTURO II S.A (PIE)	27.000,00
8	Sol do Futuro III	02/03/2019	100% para CENTRAL FOTOVOLTAICA SOL DO FUTURO III S.A. (PIE)	27.000,00

Fonte: <https://app.powerbi.com>, acesso em 10/02/2021.