

DENIS BERGAMO DE OLIVEIRA
FELIPE LEBENSOLD
LUCAS TABUSO DE OLIVEIRA

DESTINAÇÃO FINAL DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS PÓS
CONSUMO NO BRASIL

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

São Paulo
2017

DENIS BERGAMO DE OLIVEIRA
FELIPE LEBENSOLD
LUCAS TABUSO DE OLIVEIRA

DESTINAÇÃO FINAL DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS PÓS
CONSUMO NO BRASIL

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Maurício Barbosa de
Camargo Salles

São Paulo
2017

Catálogo-na-publicação

Oliveira, Denis

DESTINAÇÃO FINAL DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS PÓS CONSUMO
NO BRASIL / D. Oliveira, F. Lebensold, L. Oliveira -- São Paulo, 2017.
100 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Resíduos Sólidos 2. Placas Fotovoltaicas 3.Gestão de Resíduos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
de Hidráulica e Ambiental II.t. III.Lebensold, Felipe IV.Oliveira, Lucas

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, nossos familiares pelo suporte na realização deste trabalho. Em segundo lugar, agradecemos ao nosso querido Professor Orientador, Prof. Dr. Maurício Barbosa de Camargo Salles, sem o qual o relatório não teria as qualidades e resultados apresentados. Toda sua coordenação foi essencial para o cumprimento dos objetivos do trabalho ao longo do cronograma.

ÍNDICE

1.	Introdução e Objetivo	1
1.1	O Surgimento das Placas Fotovoltaicas.....	1
1.2	Queda no Preço das Placas Fotovoltaicas.....	2
1.3	O Potencial de Geração de Energia Solar no Brasil e no Mundo.....	3
1.4	O Potencial de Geração de Energia Solar no Brasil e a Demanda de Energia 4	
1.5	Tecnologias Disponíveis no Mercado.....	6
1.6	Objetivos	8
1.7	Metodologia.....	8
2.	Levantamento dos Dados	12
2.1	Panorama Energético Brasileiro.....	12
2.1.1	Evolução da Matriz Elétrica Brasileira	12
2.1.2	A Geração Distribuída no Brasil.....	15
2.1.3	Relação da Geração Distribuída e da Energia Solar no Brasil	16
2.2	Projeção da Geração de Energia Solar.....	17
2.2.1	Geração Distribuída.....	17
2.2.2	Geração Centralizada.....	19
2.3	Legislações Nacionais e Internacionais	20
2.3.1	Legislação Internacional	20
2.3.2	Legislação Brasileira: Política Nacional de Resíduos Sólidos	25
2.3.3	A Política Nacional de Resíduos Sólidos e os Resíduos Perigosos	27
2.3.4	A Política Nacional de Resíduos Sólidos e os REEE	28
2.3.5	Critérios para classificação do resíduo pela regulação brasileira	28
2.3.6	Classificação dos resíduos de painéis fotovoltaicos	29
2.4	Políticas de Descarte: Estudos de Caso	30
2.5	Processos de reciclagem de placas fotovoltaicas	33
3.	Análise dos Dados e Definição do Problema	36
3.1	Cálculo do número de placas fotovoltaicas e massa a ser descartada	36
4.	Alternativas para Solução do Problema	46
4.1	Processos e Custos de Reciclagem.....	46

4.2	Cálculo do valor gerado com a reciclagem	52
5.	Políticas de Descarte	59
5.1	Premissas para a Política de Descarte	59
5.2	Delimitação das Partes Envolvidas (<i>stakeholders</i>)	62
5.3	Política de gestão dos resíduos de painéis fotovoltaicos	65
6.	Conclusão	71
7.	Sugestão para Trabalhos Futuros	73
8.	Referências Bibliográficas.....	74

RESUMO EXECUTIVO

Este trabalho tem como objetivo propor a destinação final mais adequada para as placas fotovoltaicas pós consumo no Brasil até 2050, bem como propor uma política de gestão. A justificativa para tal tema foi devido ao aumento exponencial do uso de placas fotovoltaicas para geração de energia elétrica no mercado brasileiro nos últimos 10 anos sem uma regulação que garantisse o descarte ambientalmente correto, uma vez que podem apresentar componentes tóxicos. A metodologia utilizada foi a análise do panorama atual brasileiro e mundial das placas fotovoltaicas e sua destinação final, a projeção da quantidade em massa de placas fotovoltaicas pós consumo que serão descartadas até 2050 no Brasil, a análise de processos de reciclagem de placas fotovoltaicas e a viabilidade de implantá-los. Considerou-se a quantidade de placas usadas tanto na geração de energia distribuída quanto na geração centralizada, as regulações existentes no Brasil pertinentes ao tipo de resíduo sólido, as tecnologias mais utilizadas no mercado brasileiro, os componentes presentes, os custos tanto do processo de reciclagem quanto da disposição final dos rejeitos e a venda dos materiais recuperados. Avaliou-se que a melhor classificação para as placas fotovoltaicas pós consumo seria como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). O resultado encontrado foi de 32 milhões de placas fotovoltaicas descartadas até 2050. Para o cálculo da viabilidade econômica da reciclagem das placas fotovoltaicas foram considerados três cenários distintos: disposição das placas em Aterros Classe I (Cenário A); reciclagem apenas de vidro (Cenário B); reciclagem e recuperação de vidro e metais (Cenário C). Os resultados obtidos foram de R\$218,4 milhões de custo no Cenário A, R\$270,6 milhões no Cenário B e R\$0,1 milhões de lucro no Cenário C.

Para a elaboração da política de gestão das placas fotovoltaicas pós consumo, analisou-se as especificidades brasileiras quanto à fatores geográficos, sociais e legislativos. Verificou-se as partes diretamente envolvidas no processo e atribuiu-se as funções de cada uma delas, seus papéis e responsabilidades, a fim de desenhar uma estrutura sustentável para o longo prazo e possível de ser implementada.

Palavras-chave: resíduo sólido, placas fotovoltaicas, destinação final, pós consumo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da eficiência de placas fotovoltaicas com maior penetração no mercado mundial.....	2
Figura 2 - Evolução do preço das placas fotovoltaicas por Watt.....	3
Figura 3 - Evolução do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).....	5
Figura 4 - Área instalada de placas fotovoltaicas para suprir a demanda de energia elétrica do SIN.....	6
Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	11
Figura 6 - Conceito de Geração Distribuída	14
Figura 7 - Evolução da capacidade mundial instalada da produção de energia	15
Figura 8 - Evolução da geração e unidades geradores de energia solar no Brasil ...	17
Figura 9 - Potência Instalada Fotovoltaica Distribuída Acumulada (GWp)	18
Figura 10 - Projeção da geração de energia fotovoltaica distribuída.....	19
Figura 11 - Símbolo que indica a coleta seletiva de EEE	23
Figura 12 - Gestão e Hierarquia do Gerenciamento dos resíduos sólidos	26
Figura 13 - Atribuições da logística reversa para produtos acordados pela lei 12.305/2010	27
Figura 14 - Projeção da geração de energia solar distribuída e centralizada.....	37
Figura 15 - Radiação Solar média diária por região	38
Figura 16 - Evolução da eficiência média das placas fotovoltaicas	39
Figura 17 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas em operação para geração distribuída por ano.....	41
Figura 18 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas em operação para geração centralizada por ano.....	41
Figura 19 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração distribuída compradas por ano	42
Figura 20 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração centralizada compradas por ano	43
Figura 21 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração distribuída descartadas por ano.....	43

Figura 22 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração centralizada descartadas por ano.....	44
Figura 23 - Processo de tratamento e reciclagem de vidro - Cenário B	47
Figura 24 - Processo de tratamento e reciclagem de vidro e metais - Cenário C	48
Figura 25 - Divisão das partes envolvidas (Stakeholders)	63
Figura 26 - Resumo fluxo da política para pequenos produtores	68
Figura 27 - Resumo fluxo da política para grandes produtores.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa do <i>market share</i> das tecnologias de placas fotovoltaicas no mercado brasileiro	7
Tabela 2 - Composição das placas fotovoltaicas	7
Tabela 3 - Comparação Matriz Elétrica Brasileira 2009 e 2017	13
Tabela 4 - Projeções da geração distribuída fotovoltaica	18
Tabela 5 - Evolução da geração centralizada de energia solar	20
Tabela 6 - Tabela comparativa das legislações estadunidense e californiana relacionadas às placas fotovoltaicas	24
Tabela 7 - Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação	29
Tabela 8 - Irradiação anual média calculada	38
Tabela 9 - Participação de cada tecnologia no total de energia produzida	40
Tabela 10 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas descartadas até 2050	44
Tabela 11 - Estimativa da massa descartada de placas de silício separada por componentes até 2050	45
Tabela 12 - Estimativa da massa descartada de placas de filme fino de telureto de cádmio silício separada por componentes até 2050	45
Tabela 13 - Eficiência de recuperação de materiais após o processo de tratamento e reciclagem	49
Tabela 14 - Custos de tratamento e disposição final para cada cenário considerado	51
Tabela 15 - Estimativa do custo de reciclagem de vidro e metais das placas fotovoltaicas	52
Tabela 16 - Estimativa do custo de reciclagem de vidro das placas fotovoltaicas	53
Tabela 17 - Estimativa do custo de aterrar o rejeito das placas fotovoltaicas usadas na geração distribuída	53
Tabela 18 - Estimativa do custo de aterrar o rejeito das placas fotovoltaicas usadas na geração centralizada	54
Tabela 19 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro e metais dos materiais usados na geração distribuída	55

Tabela 20 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro e metais dos materiais usados na geração centralizada	55
Tabela 21 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro dos materiais usados na geração distribuída	56
Tabela 22 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro dos materiais usados na geração centralizada.....	56
Tabela 23 - Lucro estimado sem a reciclagem das placas fotovoltaicas	57
Tabela 24 - Lucro estimado com a reciclagem de vidro das placas fotovoltaicas	57
Tabela 25 - Lucro estimado com a reciclagem de vidro e metais das placas fotovoltaicas	58
Tabela 26 - Participação de cada tecnologia no total de energia produzida	79
Tabela 27 - Projeção da geração de energia solar distribuída e centralizada	80
Tabela 28 - Evolução da eficiência média das placas fotovoltaicas	81
Tabela 29 - Número de placas fotovoltaicas em operação para geração distribuída por ano	82
Tabela 30 - Número de placas fotovoltaicas em operação para geração centralizada por ano	83
Tabela 31 - Número de placas fotovoltaicas para geração distribuída compradas por ano	84
Tabela 32 - Número de placas fotovoltaicas para geração centralizada compradas por ano	85
Tabela 33 - Número de placas fotovoltaicas para geração distribuída descartadas por ano	86
Tabela 34 - Número de placas fotovoltaicas para geração centralizada descartadas por ano	87

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B2B	Produtor para Produtor
B2C	Produtor para Consumidor Final
CalRecicly	Departamento de Reciclados e Recuperação de Recursos da Califórnia
CCR	Código de Regulamentos Califórnia
CF	Constituição Federal
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EEE	Equipamentos elétricos e eletrônicos
e-lixo	Lixo eletrônico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
GD	Geração Distribuída
GC	Geração Centralizada
GES	Guarantor of Electric Services
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	International Renewable Energy Agency
NREL	National Renewable Energy Laboratory
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCBs	Bifenilas policloradas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCRA	Ato de Recuperação e Conservação de Recursos
REEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
RN	Resolução Normativa
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SIN	Sistema Interligado Nacional
Stiftung EAR	Stiftung Elektro-altgeräte Register
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TCLP	Toxicidade Lixiviado Produzido
US EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
WEEE Directive	Waste Electrical and Electronic Equipment Directive

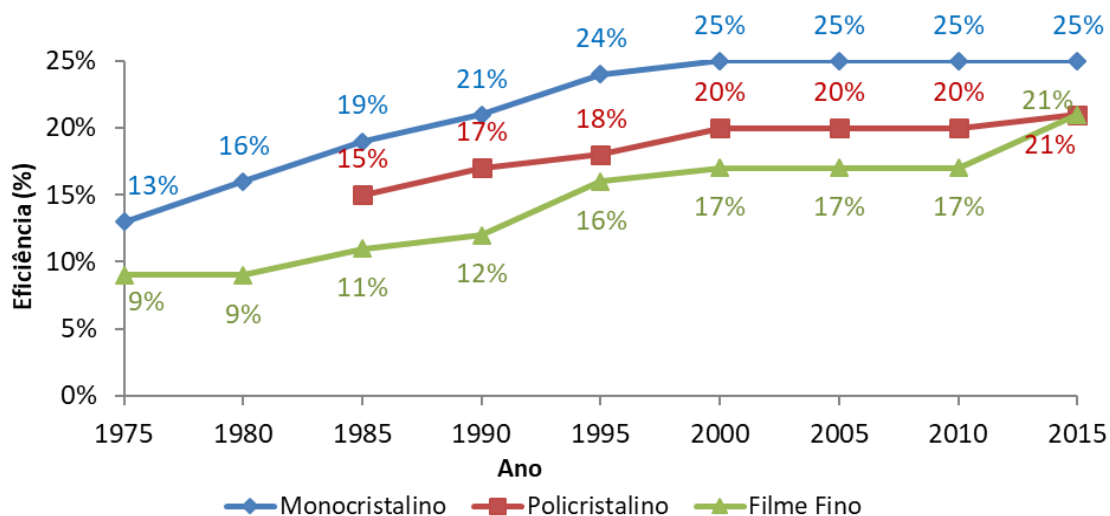
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1 O SURGIMENTO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

O descobrimento do efeito fotovoltaico data do início do século XIV, entretanto o surgimento da primeira célula fotovoltaica ocorreu em 1883 pelo norte-americano Charles Fritts. Esta primeira célula era constituída por selênio e coberta com ouro e sua eficiência era de aproximadamente 1% de acordo com a revista Cenários Solar de 2016.^[1]

Atualmente, a placa mais eficiente possui uma taxa de conversão de 46% de energia solar em energia elétrica segundo pesquisa feita pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) em 2017^[2], entretanto ainda não é economicamente viável. Neste trabalho, não serão abordadas tecnologias de placas fotovoltaicas sem viabilidade econômica, serão consideradas apenas as tecnologias com maior penetração no mercado brasileiro, ou seja, as placas de silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de telureto de cádmio. Para observar a evolução do desempenho das tecnologias relevantes a este trabalho, elaborou-se um gráfico da evolução da eficiência delas em relação ao tempo com os dados do estudo de eficiência realizado pela NREL. O resultado pode ser observado na Figura 1, na qual percebe-se que a eficiência tem aumentado ao longo do tempo, sendo a placa de silício monocristalina a mais eficiente com 25% de rendimento e 4 pontos percentuais acima das placas de silício policristalino e filme fino de telureto de cádmio.

Figura 1 - Evolução da eficiência de placas fotovoltaicas com maior penetração no mercado mundial



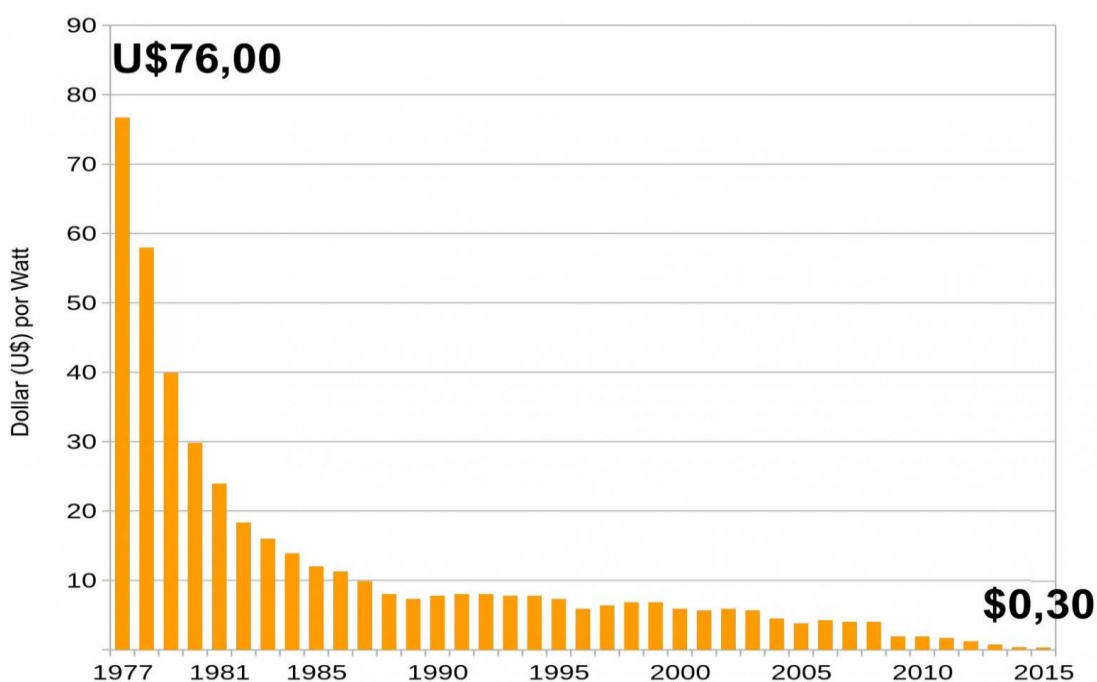
Fonte: Adaptado de NREL (2017) ^[2]

Conforme observado na Figura 1, o cenário de aumento de eficiência, em conjunto com a diminuição nos preços das placas, faz com que a energia solar passe a ter cada vez mais peso na matriz energética dos países, resultado da maior acessibilidade na instalação dos sistemas solares pela população^[3].

1.2 QUEDA NO PREÇO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

Um dos principais fatores considerados ao analisar a viabilidade de uma tecnologia é o seu custo. A queda do custo da geração de energia solar é um dos fatores que possibilita esta tornar-se cada vez mais atraente. Um estudo feito pela Bloomberg New Energy Finance (2015)^[4] mostra a queda do custo por Watt nas placas fotovoltaicas de silício, observado na Figura 2.

Figura 2 - Evolução do preço das placas fotovoltaicas por Watt



Fonte: Bloomberg New Energy Finance (2015)^[4]

O Brasil ainda está no início da utilização da energia solar como forma de suprimento da cadeia elétrica, entretanto, por se tratar de um país com clima tropical e com níveis de irradiação superiores aos de países que já adotam este tipo de energia de forma ostensiva, é esperado que haja um aumento expressivo da participação desta tecnologia nos próximos anos.

1.3 O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO

Para se obter o potencial de geração de energia solar do Brasil utilizou-se o estudo Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira de 2012 realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)^[5], no qual utiliza-se os dados de irradiação no território brasileiro presentes no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006)^[6], produzido no âmbito do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

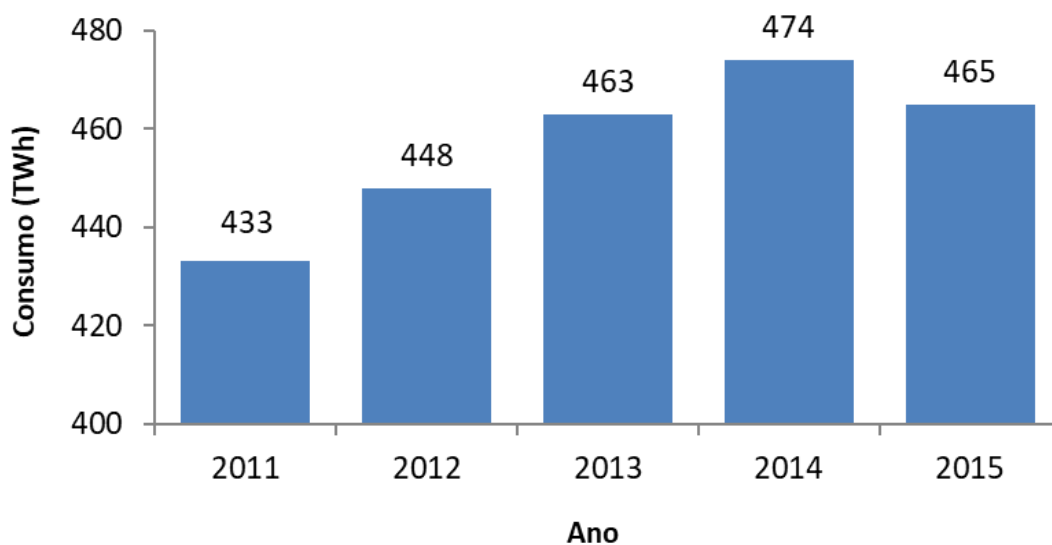
Segundo os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006, a irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 a 2.400kWh/m²/ano, enquanto alguns países europeus que estão em estágios mais evoluídos do uso da energia solar apresentam níveis de irradiação significativamente inferiores, variando entre 900 a 1.250kWh/m²/ano na Alemanha, entre 900 a 1.650kWh/m²/ano na França e entre 1.200 e 1.850kWh/m²/ano na Espanha^[6]. Assim, percebe-se que no Brasil existe uma grande oportunidade desenvolvimento neste mercado.

No Brasil, a região com maior potencial de geração de energia solar está localizada no Nordeste e Noroeste de Minas Gerais, onde as condições climáticas conferem um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar, enquanto as regiões de menor potencial estão localizadas nas regiões mais ao sul como a costa norte do Estado de Santa Catarina, o litoral do Paraná e o litoral sul de São Paulo.^[5]

1.4 O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL E A DEMANDA DE ENERGIA

Para os fins deste trabalho, considerou-se que a irradiação média no território brasileiro se manteve igual à apresentada no Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006^[6]. A área necessária de placas fotovoltaicas instaladas para suprir o consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), obtido através do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2012^[7], de 433TWh, em 2011, seria de, aproximadamente, 2.400km², pouco mais que a metade da área da região metropolitana de Salvador - BA, em local com insolação média da ordem de 1.400kWh/m²/ano, segundo estudo da EPE^[5]. A evolução do consumo de energia elétrica do SIN foi obtida a partir do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2016)^[8], visto que este era o estudo mais recente no momento da publicação deste trabalho, sendo apresentado na Figura 3.

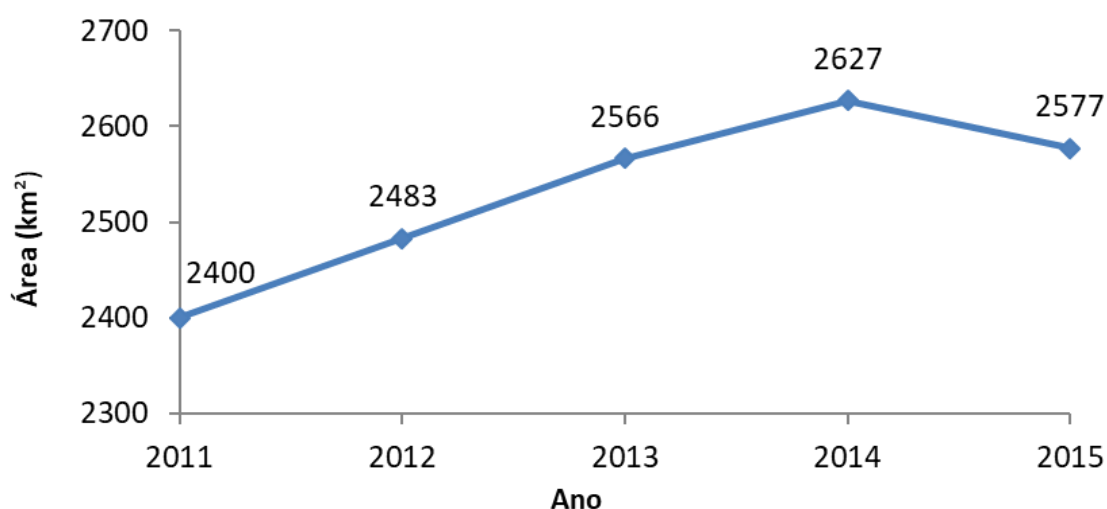
Figura 3 - Evolução do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN)



Fonte: Adaptado de EPE (2016)^[5]

Com a evolução do consumo de energia elétrica foi realizada uma estimativa da evolução da área instalada de placas fotovoltaicas necessárias para suprir a crescente demanda por energia elétrica, como mostra a Figura 4. Para esta estimativa foram considerados os mesmos parâmetros de irradiação e eficiência das placas adotadas pela EPE no estudo Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira (2012)^[5].

Figura 4 - Área instalada de placas fotovoltaicas para suprir a demanda de energia elétrica do SIN



Fonte: Elaboração própria

Visando obter a representatividade da área de placas instaladas frente à área total do Brasil, levantaram-se os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)^[9], que calcula a área total brasileira em aproximadamente 8.515.767km². Portanto, para suprir a demanda energética do SIN, seria necessário ocupar cerca de 0,031% do território nacional com placas fotovoltaicas.

1.5 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS NO MERCADO

Como comentado anteriormente, serão consideradas neste trabalho, apenas as três tecnologias com maior penetração no mercado mundial e brasileiro: as placas de silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de telureto de cádmio. O *market share* de cada tecnologia foi obtido a partir do estudo Photovoltaics Report (2016) realizado pelo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE)^[10], no qual é possível obter a participação de cada tecnologia na produção mundial. Devido à falta de informação quanto à utilização de cada tecnologia no mercado brasileiro, adotou-se que a penetração é igual à distribuição da produção mundial de placas fotovoltaicas. Segundo o estudo da Fraunhofer ISE (2016)^[10], tem-se a estimativa da distribuição na participação dessas placas no Brasil, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa do *market share* das tecnologias de placas fotovoltaicas no mercado brasileiro

Tecnologia	Participação no Mercado
Silício Policristalino	68%
Silício Monocristalino	25%
Filme Fino de Telureto de Cádmio	5%
Outros	2%

Fonte: Adaptado de Fraunhofer ISE (2016)^[10]

Outro fator que deve ser levado em consideração para a análise das diferentes tecnologias é a composição de cada uma delas. Os percentuais aproximados de massa de cada componente das 3 tecnologias estudadas neste trabalho foram obtidos a partir do estudo End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels realizado pela International Renewable Energy Agency (IRENA) em 2016^[10] e são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das placas fotovoltaicas

Materiais	Silício Monocristalino / Policristalino	Filme Fino de Telureto de Cádmio
Vidro	74,16%	95,00%
Polímero	11,31%	3,50%
Alumínio	10,30%	0,35%
Silício	3,35%	-
Cobre	0,57%	1,00%
Prata	0,01%	-
Estanho	0,12%	-
Zinco	0,12%	0,01%
Chumbo	0,06%	-
Telúrio	-	0,07%
Cádmio	-	0,07%

Fonte: Adaptado de IRENA (2016)^[10]

Pode-se observar que o vidro é o material com maior participação na massa das placas, mas há elementos de maior valor como o cobre, telúrio, alumínio, silício e a prata, ainda há elementos prejudiciais ao meio ambiente como o chumbo e o cádmio.

1.6 OBJETIVOS

Tendo em vista o aumento exponencial do uso de placas fotovoltaicas para geração de energia elétrica e devido à presença de componentes tóxicos em sua composição, este Trabalho de Formatura tem como objetivo geral propor a destinação final das placas fotovoltaicas pós consumo projetando as tecnologias com maior penetração estimados até 2050.

Os objetivos específicos são:

- i. Dimensionamento da quantidade de placas fotovoltaicas a serem descartadas;
- ii. Análise dos custos e eficiência do processo de reciclagem;
- iii. Cálculo do volume e custo de disposição final;
- iv. Proposta de política de gestão dos resíduos de energia solar.

1.7 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para atingir os objetivos deste Trabalho de Formatura será dividida em duas partes, a primeira parte refere-se aos primeiros 3 objetivos, e a segunda ao último, sobre a proposta da política de gestão.

1) Levantamento dos dados dos panoramas energéticos brasileiros

Primeiramente, obtiveram-se os dados referentes à distribuição da matriz energética brasileira, a fim de se ter uma visão da atual conjuntura elétrica do país.

Com estes dados percebe-se a crescente geração de energia elétrica a partir da energia solar e a tendência desta continuidade no horizonte estudado, levando à preocupação referente ao descarte deste crescente número de placas fotovoltaicas. Separação entre a forma de geração distribuída e centralizada, uma vez que a logística para o descarte deve ser tratada de maneira diferente.

2) Levantamento de dados referente às legislações nacionais e internacionais de descarte de placas fotovoltaicas

Pesquisa sobre o posicionamento legal de outros países frente ao gerenciamento de placas fotovoltaicas e o levantamento da legislação brasileira pertinente.

3) Projeção da geração de energia solar

Levantamento da estimativa de produção anual de energia solar distribuída e centralizada até 2050.

4) Estimativa da geração de placas fotovoltaicas pós consumo

Para a estimativa da quantidade de placas fotovoltaicas que serão descartadas levou-se em conta a projeção da produção de energia solar, o tempo de vida médio, a eficiência e a composição das placas fotovoltaicas com maior presença no Brasil.

Dada a estimativa da geração de resíduo, dimensionou-se a massa total a ser descartada ao longo dos anos até 2050.

5) Análise dos custos e eficiência da reciclagem de placas fotovoltaicas

Pesquisou-se o método mais usual de reciclagem de placas fotovoltaicas, para análise de quais materiais podem ser reciclados e o custo associado a este tratamento.

6) Dimensionamento da massa de materiais a ser aterrado

Considerando os materiais que não podem ser recuperados através do processo de reciclagem, calculou-se a massa estimada de rejeitos que será destinada para disposição final em aterros sanitários.

7) Estimativa de custos de disposição final

A partir da massa de cada material que será destinado ao aterro sanitário, estimou-se o custo para disposição final, baseando-se no preço atual de descarte por tonelada de resíduo.

8) Estabelecimento de premissas para a política de gestão

O Brasil possui características muito distintas de outros países que já possuem uma política de gestão dos resíduos da energia solar, como a Alemanha, assim, não é

possível realizar uma mera cópia do sistema em vigor nesse país. Dessa forma, é necessário estabelecer como os aspectos geográfico, culturais, sociais e legislativos influenciam na delimitação de uma política de gestão para que se proponha um sistema que funcione efetivamente para o Brasil.

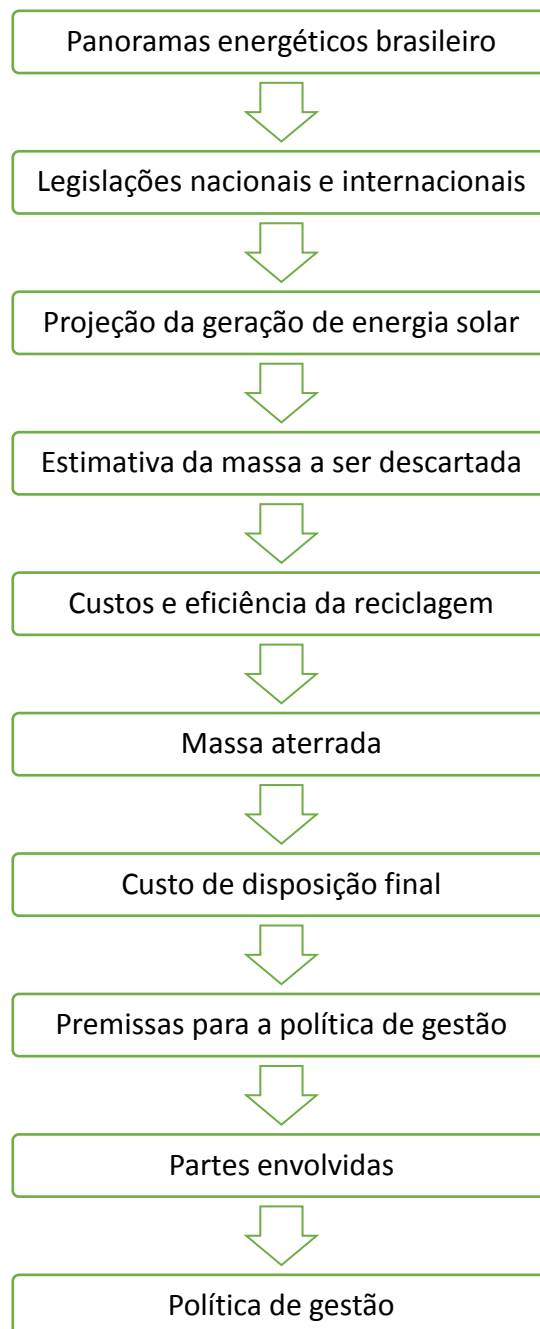
9) Levantamento das partes envolvidas

Por meio da metodologia de Mitchell, Agle e Wood (1997) voltada para identificação das partes envolvidas (*stakeholders*), lista-se todos as partes interessadas no processo de gestão, ordenando-as por prioridades e envolvimento direto. Assim, pode-se determinar os papéis de cada parte que participará na política, suas obrigações diretas e responsabilidades.

10) Delimitação da política

Com as premissas levantadas e as partes definidas, segue-se para a delimitação da política, estabelecendo como cada *stakeholder* procederá, suas responsabilidades e como será a interação entre eles.

A Figura 5 mostra o fluxograma referente a metodologia empregada para este Trabalho de Formatura.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada

Fonte: Elaboração própria

2. LEVANTAMENTO DOS DADOS

2.1 PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

2.1.1 Evolução da Matriz Elétrica Brasileira

A matriz elétrica brasileira possui predomínio de fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. Dentre elas, a mais relevante é a hidrelétrica, cuja capacidade instalada atual corresponde a aproximadamente 65% do total disponível na matriz, segundo dados do ministério de minas e energia (Boletim de Monitoramento Mensal do Sistema Elétrico, 2017)^[11]. Embora o predomínio da fonte hídrica seja relevante, sua participação na produção total vem diminuindo consideravelmente, sendo que outras fontes renováveis vêm ganhando destaque, como a energia solar.

Analisando os dados do Ministério de Minas e Energia, observa-se que no período de dez/2009 a mar/2017, a fonte hidráulica teve uma redução de, aproximadamente, 10%, espaço que foi ocupado pelas outras fontes. A energia solar teve uma grande evolução, tanto do ponto de vista de unidades geradoras quanto em capacidade produtiva. Observa-se na Tabela 3, que o principal elemento que propiciou esse crescimento foi a implementação de novas placas, agregando-os a rede. Esse fenômeno é explicado pelo conceito de Geração Distribuída, que será desenvolvido a seguir.

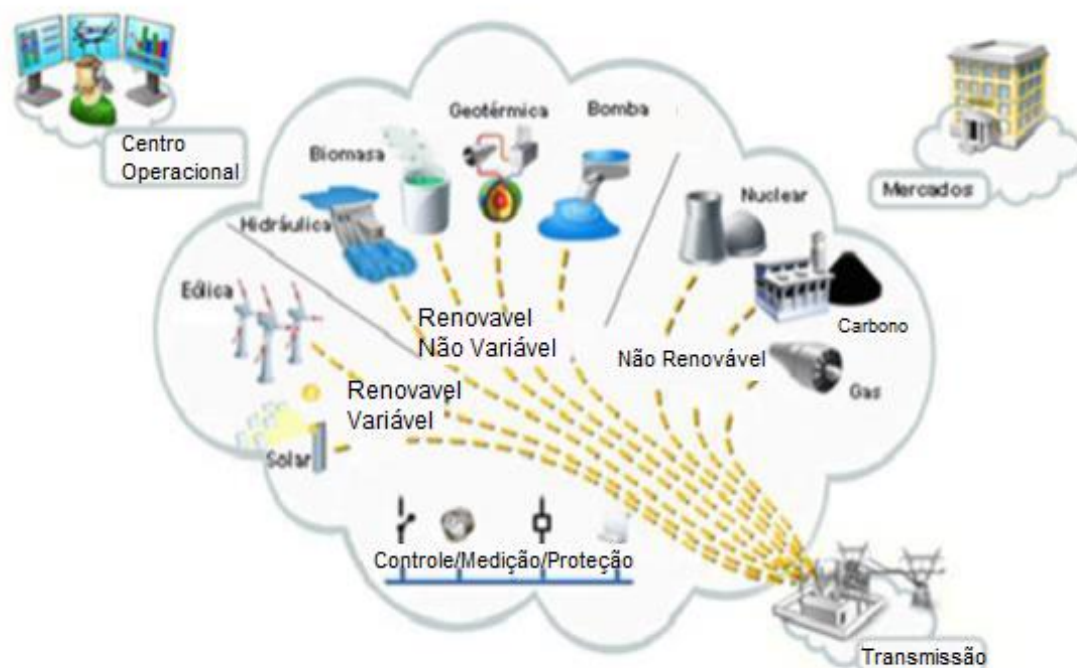
Tabela 3 - Comparação Matriz Elétrica Brasileira 2009 e 2017

Data	dez/09		mar/17		Evolução da Fonte
Fonte	MW	Participação	MW	Participação	MW
Hidrelétrica	78.610	73,76%	98.110	64,57%	25%
Térmica Total	27.357	25,67%	43.354	28,54%	58%
Gás	12.055	11,31%	13.009	8,56%	8%
Biomassa	6.100	5,72%	14.250	9,38%	134%
Petróleo	5.664	5,32%	10.326	6,80%	82%
Nuclear	2.007	1,88%	1.990	1,31%	-1%
Carvão Mineral	1.530	1,44%	3.613	2,38%	136%
Outros	0	0,00%	150	0,10%	-
Térmica GD	0	0,00%	16	0,01%	-
Eólica Total	602	0,57%	10.374	6,83%	1622%
Eólica	0	~0,00%	10.364	6,82%	-
Eólica GD	0	~0,00%	10	0,01%	-
Solar Total	0,2	~0,00%	94	0,07%	469900%
Solar	1	~0,00%	25	0,02%	-
Solar GD	0	~0,00%	69	0,05%	-

Fonte: Elaboração própria baseada em dados do Boletim Energético do Ministério de Minas e Energia de 2009 a 2017^[11]

Geração Distribuída (GD) é definida como sendo o uso integrado ou isolado de recursos de concessionárias de pequeno porte, consumidores e/ou terceiros para gerar energia elétrica^[7].. A Figura 6 ilustra o conceito geral de GD.

Figura 6 - Conceito de Geração Distribuída

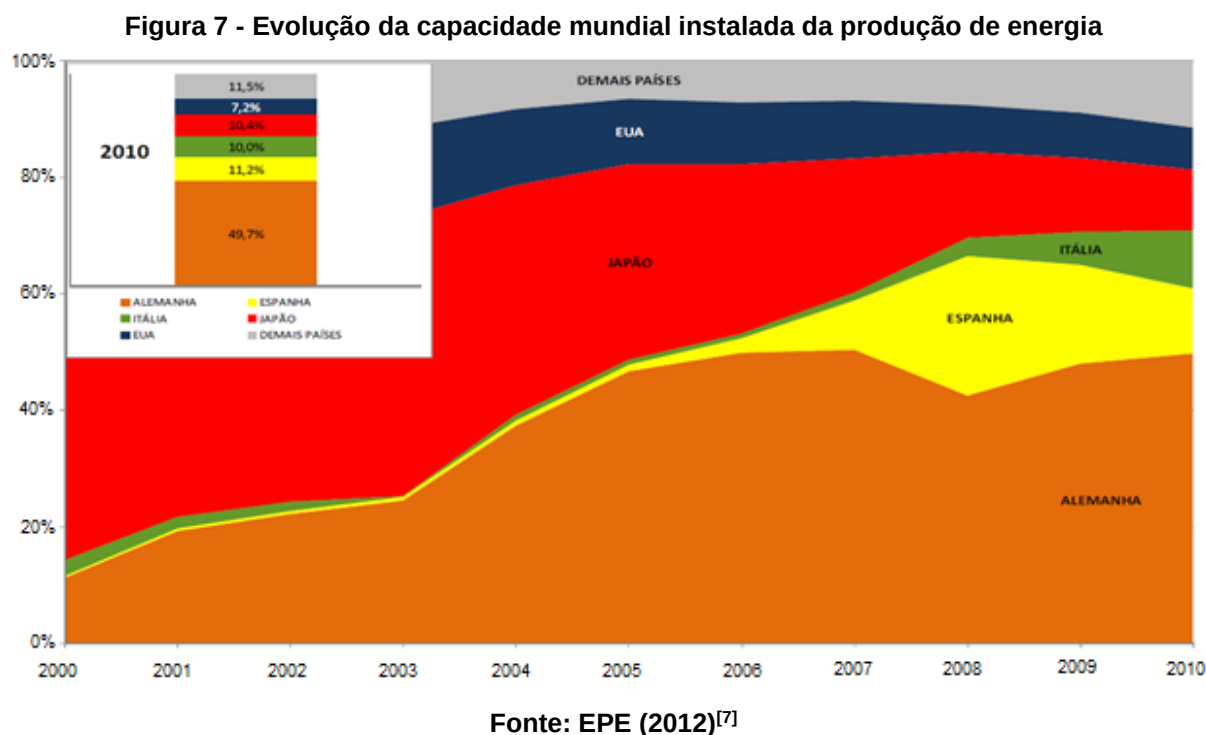


Fonte: Adaptado de EPRI (2009) apud OLADE (2011)^[12]

A Geração Distribuída apresenta vantagens para a sociedade, o meio ambiente e o setor elétrico. De acordo com Barbosa e Azevedo (2013)^[16], há um aumento da confiabilidade do suprimento energético aos consumidores próximos à geração local para a sociedade, por adicionar fontes pouco sujeitas a falhas na transmissão e distribuição. Para o meio ambiente, cita-se a minimização dos impactos ambientais, pela redução da necessidade de grandes instalações (como plantas hidrelétricas). Já para o setor elétrico, existe uma possível redução dos custos, adiando investimentos em subestações de transformação e em capacidade adicional para transmissão (HOFF *et al.*, apud OLADE, 2011)^[15], bem como a melhoria da estabilidade do sistema, devido à existência de reservas de GD e do uso de controle centralizado do despacho^[17].

A expansão da energia solar está intimamente ligada à consolidação da Geração Distribuída, já que esse conceito permite o aumento do uso de placas fotovoltaicas para uso residencial e/ou comercial. Em países como Alemanha e Japão, as primeiras políticas de incentivo à GD surgiram no começo da década de 1990 com programas de financiamento para placas fotovoltaicas e incentivos governamentais. A lei alemã

Feed-in-Law estabeleceu a compra da energia produzida por autogeradores pelas concessionárias, e o programa japonês de instalação de 70.000 telhados solares. Como resultado, ambos países figuram dentre os principais produtores mundiais de energia solar, demonstrado na Figura 7.



2.1.2 A Geração Distribuída no Brasil

No Brasil, Geração Distribuída é definida pelo artigo 14 da Lei nº 5.163/2004^[14] que versa:

Considera-se geração distribuída toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...) conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de: hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30MW; termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%.

Embora a lei que define GD seja de 2004, a Resolução Normativa (RN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, RN ANEEL 482^[18], surgiu apenas em 2012, sendo o primeiro produtor independente agregado ao sistema por meio da GD datado de 03/02/2012, um atraso de 8 anos. A lista abaixo relaciona as principais características definidas pela RN 482/2012^[18] e RN 687/2015^[19] para integração de autoprodutores à rede:

- Microgeração até 75kW e minigeração até 5MW;
- O produtor tem o direito de utilizar os créditos por excedente de energia injetada na rede em até 60 meses;
- Possibilidade de utilização da geração e distribuição em cotas de crédito para condomínios;
- Autoconsumo remoto onde existe a geração em uma unidade e o consumo em outra unidade de mesmo titular;
- Geração compartilhada onde um grupo de unidades consumidoras é responsável por uma única unidade de geração.

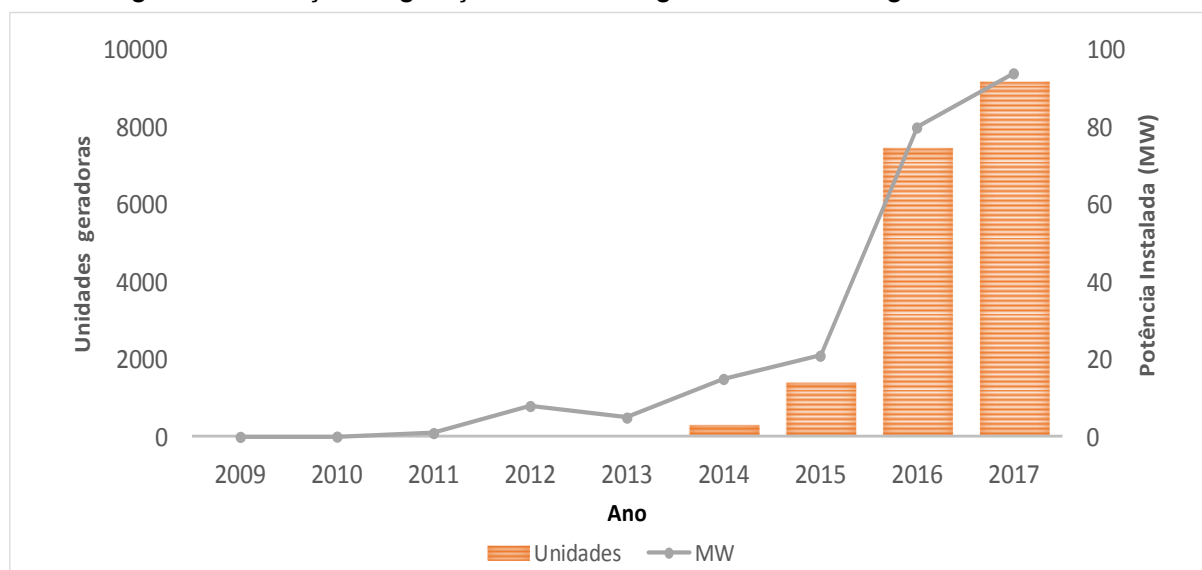
2.1.3 Relação da Geração Distribuída e da Energia Solar no Brasil

Antes da regulamentação da GD no Brasil, a energia solar era uma opção restrita à consumidores isolados ou remotos, em situações em que a extensão da rede elétrica não era economicamente viável. Assim, em 2011 dos cerca de 20MW de capacidade instalada com origem fotovoltaica, estima-se que 99% era para atendimento de grupos isolados/remotos^[20], incluindo aplicações como antenas de telefonia e radares de trânsito.

O incremento de novos geradores à rede propiciado pela RN 482 gerou um crescimento vultoso da energia solar. A Figura 8 mostra a evolução da energia solar no Brasil e foi elaborada com base nos boletins energéticos do Ministério das Minas e Energia de 2009 a 2017. Além disso, ilustra o crescimento de unidades produtoras e da potência instalada. Percebe-se a grande influência da GD na oferta de energia solar, por exemplo, em 2009 havia apenas uma unidade produtora com cerca de 20kW de potência, enquanto que em março de 2017 o número de unidades geradoras

passou a ser 9.175 e potência instalada de 94.000kW, um aumento superior à 469900% em termos de potência instalada. Ainda hoje, dos 94.000kW totais produzidos, 69.000kW provém de autogeradores, representando mais de 73%. Assim a GD ainda é um dos fatores mais importantes para a energia solar.

Figura 8 - Evolução da geração e unidades geradores de energia solar no Brasil



Fonte: Elaboração própria baseado em dados do Boletim Energético do Ministério de Minas e Energia ^[12]

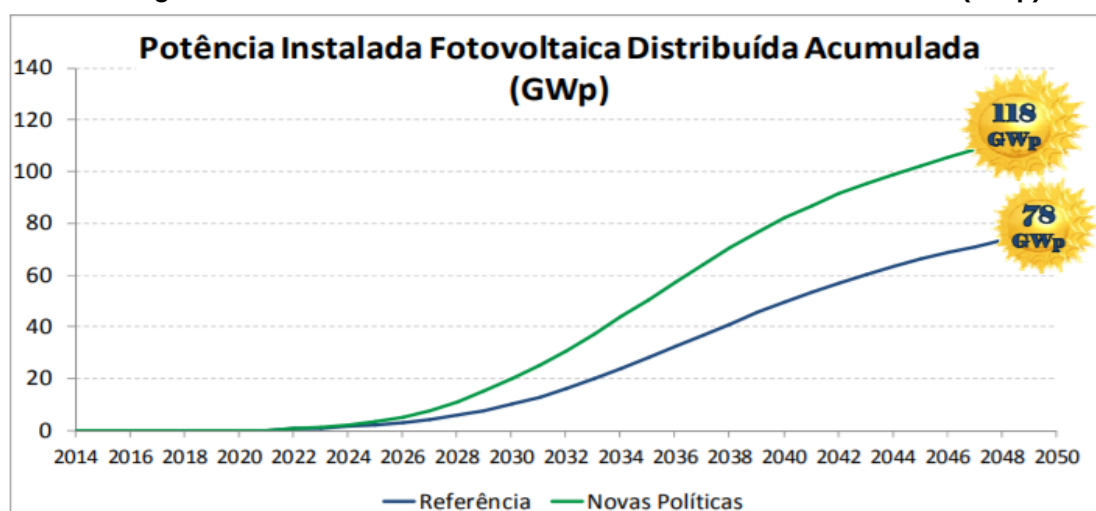
2.2 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

2.2.1 Geração Distribuída

A fim de obter a projeção da geração de energia solar distribuída utilizou-se o estudo Demanda de Energia 2050 feito pela EPE (2016)^[48], no qual se estima as demandas e produção de energia de diversas fontes, entretanto para o presente trabalho o foco será somente na energia solar. O estudo contempla dois cenários, o primeiro cenário considera uma evolução normal da curva e o segundo cenário considera que haja fomento à geração fotovoltaica descentralizada, assim como estímulo à adoção da energia solar pela população, este último chamado de cenário com “Novas Políticas”.

A maior parte dessas projeções foi realizada no ano de 2014, portanto, no momento de escrita deste Trabalho de Formatura, pode-se verificar que a projeção com as chamadas “Novas Políticas” está mais próxima da realidade, visto que em 2016 a potência instalada era de 69MW de energia solar e a projeção para 2020 neste cenário seria de 153MW contra 78MW da projeção da curva normal. Além disso, como medida de planejamento e fator de segurança para a estimativa de geração de resíduo, optou-se por um cenário mais favorável à energia solar, que resultaria na maior geração de placas fotovoltaicas pós consumo. Na Figura 9 e Tabela 4, pode-se observar que o aumento de produção de energia solar se dará de maneira acelerada e, por isso, deve-se haver um planejamento adequado sobre o que fazer com as placas fotovoltaicas no final de sua vida útil.

Figura 9 - Potência Instalada Fotovoltaica Distribuída Acumulada (GWp)



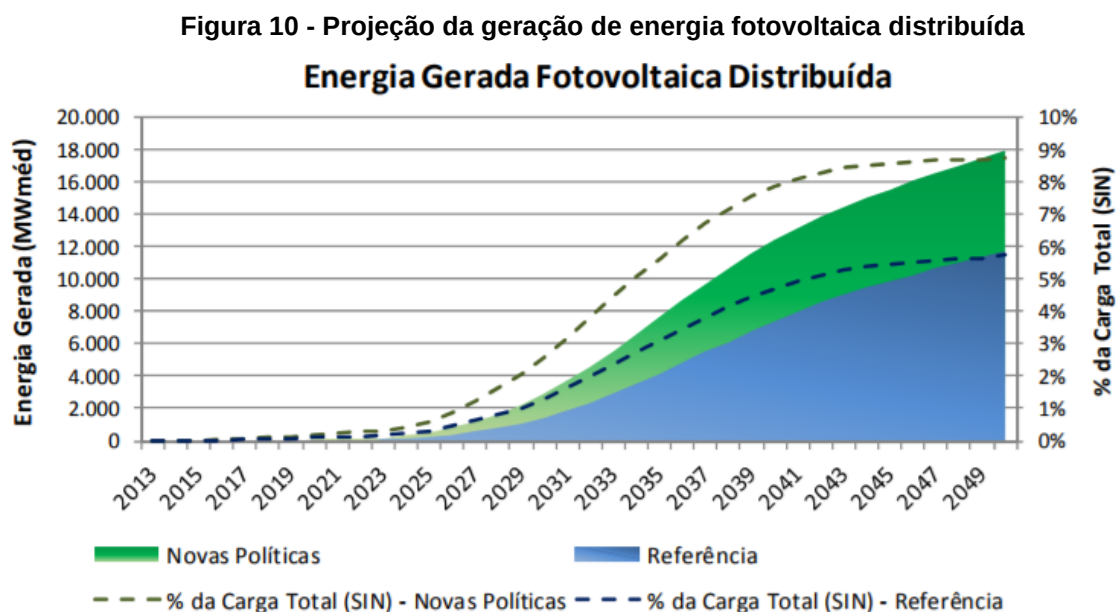
Fonte: EPE (2016) ^[48]

Tabela 4 - Projeções da geração distribuída fotovoltaica

	Referência				Novas Políticas			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Potência Instalada (GWp)	0,5	10	50	78	1	20	82	118
Energia Gerada (MWméd*)	78	1.523	7.466	11.797	153	3.001	12.511	18.029
% da Carga Total (SIN)	0,1%	1,3%	4,7%	5,7%	0,2%	2,6%	7,9%	8,7%
* Média da energia gerada por dia								

Fonte: EPE (2016) ^[48]

Utilizando o mesmo estudo da EPE (2016)^[77], é possível observar pela Figura 10 a representatividade que a energia solar distribuída passará a ter no futuro, no qual a 8,7% da carga total do SIN será proveniente da energia solar em 2050 no cenário adotado no presente trabalho.



Fonte: EPE (2016)^[48]

2.2.2 Geração Centralizada

A fim de obter a projeção da geração de energia solar centralizada, utilizou-se o documento “O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia” feito pela EPE (2016)^[49], uma vez que os planos de geração energética não contemplam a projeção para este tipo de geração. Este estudo, apesar de não ser um plano energético, representa um compromisso do Brasil frente às mudanças climáticas e apresenta planos para a matriz energética até o ano de 2030. Portanto, para o presente trabalho, será utilizado o compromisso mencionado como projeção para a geração centralizada até o ano de 2030, enquanto para os anos de 2030 à 2050, adota-se que a geração centralizada será 20% maior que geração distribuída no cenário das “Novas Políticas” obtida no estudo da EPE (2016)^[48]. O resultado pode ser observado na Tabela 8, que se estima a geração

centralizada em 2030 para aproximadamente 26.000GWh e, em 2050, cerca de 189.521GWh.

Tabela 5 - Evolução da geração centralizada de energia solar

	2005	2014	2025	2030	2040	2050
Energia Gerada Centralizada (GWh)	0	0	13.000	26.000	131.516	189.521

Fonte: Elaboração própria

2.3 LEGISLAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS

2.3.1 Legislação Internacional

2.3.1.1 Definição Legal de Placas Fotovoltaicas

Diferentemente do Brasil, alguns países estão mais avançados quanto ao gerenciamento das placas fotovoltaicas pós consumo. Na União Europeia e Estados Unidos tanto os estudos de processos quanto às questões legais estão mais desenvolvidos e consolidados^{[21][22]}. Mesmo assim, a definição quanto a classificação do produto pós-consumo, o responsável pelo descarte e como este deve ser feito ainda são muito divergentes.

Para cada país mencionado, a definição quanto a classificação das células fotovoltaicas é diferente. A União Europeia foi a primeira instituição governamental a regulamentar este assunto. Em 2012, foi escrita a Diretiva 2012/19/EU, uma reformulação da Diretiva 2002/96/EC^[23] relacionada aos REEE, incorporando as placas fotovoltaicas como REEE, como mostra o item (9) da Diretiva^[21]:

A presente diretiva deverá abranger todos os equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) utilizados pelos consumidores e os EEE destinados a utilização profissional. [...]. No entanto, todo o equipamento que não seja concebido e instalado especificamente como parte dessas instalações e que

seja capaz de cumprir a sua função mesmo sem fazer parte das mesmas, deverá ser incluído no âmbito de aplicação da presente diretiva. Refere-se isto, por exemplo, ao equipamento de iluminação ou aos painéis fotovoltaicos.^[21]

Nos Estados Unidos, não existe uma legislação federal específica para as placas fotovoltaicas pós-consumo^[22]. Acordado pelo Ato de Recuperação e Conservação de Recursos (RCRA) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), as placas fotovoltaicas são consideradas resíduos comuns e, dependendo da quantidade de metais pesados (Ag, Cd, Cu, Pb), são classificados como resíduos perigosos^[22]. Entretanto, em 2015, o Estado da Califórnia criou a SB 489, lei que modifica a classificação nacional de resíduo perigoso das placas fotovoltaicas para resíduos universais.

Resíduo universal é definido como um produto pós-consumo que contenha, principalmente, mercúrio, chumbo, cádmio e outras substâncias perigosas ao meio ambiente e para a saúde humana. Este tipo de resíduo não pode ser descartado como resíduo doméstico ou disposto em aterros sanitários de resíduos não perigosos^[22].

A justificativa para essa mudança é devido ao menor rigor dos parâmetros de metais pesados da Agência Nacional em relação ao Estado da Califórnia^[22]. Atualmente, a disposição final de placas fotovoltaicas é governada pela RCRA e políticas estaduais que regem os resíduos sólidos. Para serem governadas por este Ato, as placas fotovoltaicas devem ser classificadas como resíduos perigosos. Tal classificação é dada a partir do teste de Caracterização da Toxicidade Lixiviado Produzido (TCLP) e, como os limites dos parâmetros são menos rígidos, as placas fotovoltaicas passam pelo teste, logo, são classificados nacionalmente como não perigosos^[22].

2.3.1.2 Destinação Final das Placas Fotovoltaicas

i. União Europeia

A União Europeia, particularmente a Alemanha, liderou o desenvolvimento tecnológico e comercial das placas fotovoltaicas^[10]. A partir da explosão desse novo mercado na Europa, alguns fabricantes iniciaram estudos sobre o ciclo de vida das placas

fotovoltaicas^[24], resultando na elaboração de tecnologias para reciclar resíduos provenientes tanto da produção quanto do descarte das placas fotovoltaicas^[10].

Por outro lado, em nível global, a atenção para o ciclo de vida das placas foi majoritariamente para a sua produção^[10]. A alta demanda e a aceleração dos meios de produção para entrar no mercado dificultaram ou relegaram iniciativas voluntárias de destinação final por parte dos produtores^[10]. O resultado disso, na União Europeia, foi a necessidade da criação de uma regulamentação específica que assegure as condições equitativas para todos os participantes do mercado de placas fotovoltaicas e a garantia da coleta no longo prazo dos produtos pós-consumo e sua reciclagem^[25]. Para isso, foi adicionada à Diretiva REEE, a regulamentação dos painéis fotovoltaicos. Ao classificar as placas fotovoltaicas como um produto elétrico e/ou eletrônico, a lei da política de responsabilidade compartilhada do ciclo de vida dos produtos elétrico e eletrônicos é estendida. É imposta também, a responsabilidade para cada um dos 28 Estados membros da União Europeia sobre a implantação de coleta e tratamento das placas^[21]

Baseado na política de responsabilidade compartilhada, os produtores são encarregados de arcar com os custos de coleta, tratamento e monitoramento. Cabe, portanto, as seguintes obrigações^{[10] [21]}:

- a. **Responsabilidade financeira:** os produtores são responsáveis por garantir financeiramente os custos de coleta e reciclagem de produtos provavelmente utilizados em domicílios. Além disso, são responsáveis pelo financiamento de pontos públicos de coleta e instalações de tratamento primário. É necessário também tornar-se membro de um método de cumprimento coletivo ou criar um método próprio e individual.
- b. **Responsabilidade de laudos:** os produtores são obrigados a reportar mensalmente ou anualmente a quantidade de painéis vendidos, retirados (por meio de esquemas de conformidade individuais ou coletivos) e encaminhados para tratamento. Dentro deste esquema de relatórios, os produtores também precisam apresentar os resultados do tratamento de resíduos de produtos tratados, recuperados, reciclados e descartados como rejeito de cada material.
- c. **Responsabilidade de informação:** os produtores são responsáveis pela rotulagem das placas em conformidade com a Diretiva REEE. Devem informar aos compradores de que as placas devem ser descartadas em instalações de coleta e

não devem ser misturadas com resíduos domiciliares, além de que a coleta e a reciclagem são serviços gratuitos^[26]. Devem também informar ao comprador dos procedimentos no fim da vida útil da placa fotovoltaica. Ultimamente, os produtores são obrigados a fornecer informações às empresas de tratamento de resíduos sobre os cuidados com as placas fotovoltaicas durante a coleta, armazenamento, desmantelamento e tratamento. Esta informação contém informações específicas sobre o conteúdo de materiais perigosos e riscos operacionais potenciais. No caso de painéis fotovoltaicos, isso inclui informações sobre riscos de eletrocussão ao manusear painéis expostos à luz.

A fim de informar o consumidor final que o produto adquirido é um equipamento elétrico e eletrônico (EEE) e que deve ser descartado como tal, a Diretiva REEE cria também um símbolo (Figura 11) que indica a coleta específica de EEE.

Figura 11 - Símbolo que indica a coleta seletiva de EEE



Fonte: Parlamento Europeu (2012)^[21]

ii. Estados Unidos

Nos Estados Unidos não existe uma lei federal específica relacionada à destinação de painéis fotovoltaicos pós-consumo. Porém, o Estado da Califórnia está em processo de desenvolvimento de uma legislação para o gerenciamento dos painéis fotovoltaicos pós-consumo^[22].

Segundo a SB489, o Departamento de Reciclados e Recuperação de Recursos da Califórnia (CalRecicly) sugere que a responsabilidade do gerenciamento do descarte de placas fotovoltaicas seja do produtor. Esta responsabilidade é definida como responsabilidade estendida do produtor^[22]. Isto significa que, ao invés do consumidor final ficar encarregado da destinação final do resíduo, os produtores e distribuidores são encorajados a criar novos *designs* de produtos para minimizar os impactos significativos ao meio ambiente em todas as fases do ciclo de vida das placas fotovoltaicas. Assim, o valor do descarte já estaria incluso no custo final do produto e diminuiria drasticamente os possíveis impactos ambientais.

De acordo com os comentários finais da SB 489, ao deslocar os custos e a responsabilidade do produto pós-consumo para os produtores e outras partes diretamente envolvidas, a preocupação com a eliminação de rejeito e poluentes em todo o ciclo de vida do produto passa a ser considerada^[22]. A Tabela 6 compara como é a legislação relacionada às placas fotovoltaicas entre os Estados Unidos (Federação) e o Estado da Califórnia.

Tabela 6 - Tabela comparativa das legislações estadunidense e californiana relacionadas às placas fotovoltaicas

Estados Unidos	Estado da Califórnia
• Não existe uma legislação federal específica quanto às placas fotovoltaicas pós-consumo • Podem ser definidos como resíduos comuns ou resíduos perigosos.	• Criação da SB 489 • Define placas fotovoltaicas como resíduos universais (“universal waste”) • Justificativa: menor rigor dos parâmetros de metais pesados da US EPA

Fonte: Elaboração própria

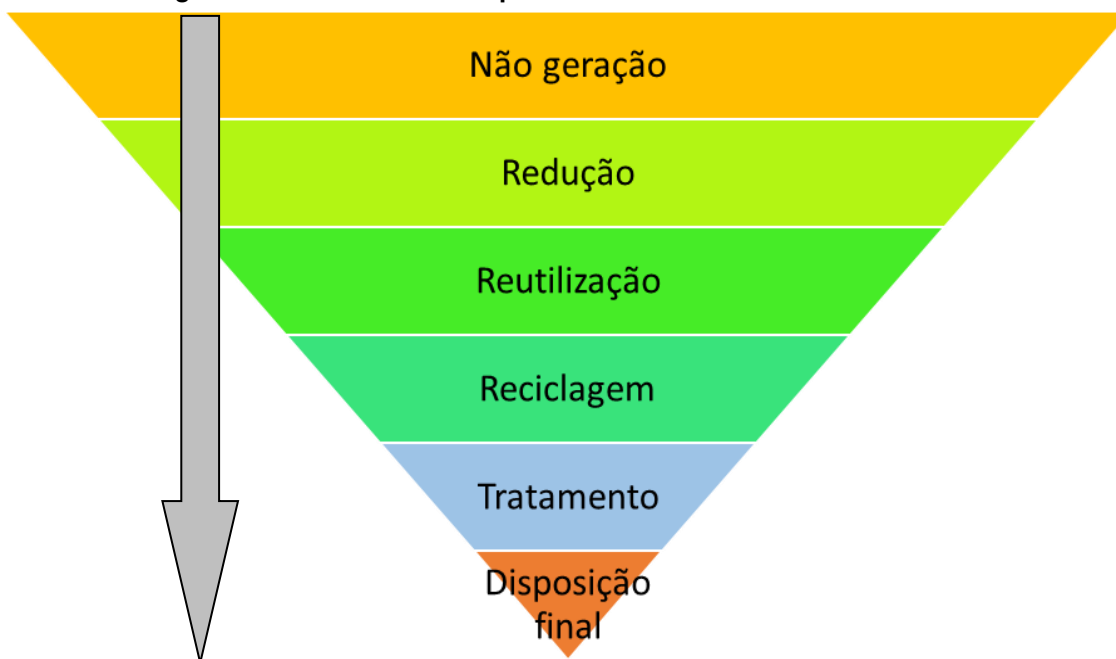
2.3.2 Legislação Brasileira: Política Nacional de Resíduos Sólidos

A criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dada pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto no 7.404/2010 consolidou as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. A PNRS incluiu a responsabilidade da gestão de resíduos perigosos e de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), aos geradores e ao poder público^[27]. Junto a esse decreto, foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, também em 2010. De acordo com o artigo 25 do plano, o poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade do cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos e demais diretrizes, logo, tanto as pessoas físicas como jurídicas estão sujeitas a aplicação dessa lei.

Segundo a PNRS, a classificação dos resíduos sólidos segue três critérios: origem, grau de degradabilidade e periculosidade^[27]. O primeiro critério engloba onze classificações quanto à origem do resíduo sólido correspondendo desde resíduos sólidos urbanos até resíduos provenientes da mineração, indústrias e agroindústrias. O segundo critério classifica o resíduo sólido em quatro diferentes graus de degradabilidade: facilmente degradável; moderadamente degradável; dificilmente degradável; não degradável. A terceira classificação divide os resíduos sólidos em perigosos e não perigosos, porém, para esse critério em específico, é adotado como parâmetro da NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que classifica os resíduos como: Classe I – Perigosos e Classe II – Não Perigosos, sendo classe IIA – Não Inertes; Classe IIB – Inertes.^[28]

Além disso, a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve seguir a ordem de prioridade mencionada no Art. 9º da PNRS: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Figura 12)^[27]. Todos os geradores de resíduos sólidos devem promover medidas de redução da geração na forma prevista no Plano Nacional de Resíduos Sólidos e melhorias quanto à triagem dos resíduos tanto dentro dos domicílios quanto em centrais de triagem de resíduos urbanos recicláveis^[27]. Os municípios devem regularizar a disposição final dos rejeitos para que sejam fechados todos os lixões e aterros controlados e sejam destinados para aterros sanitários.

Figura 12 - Gestão e Hierarquia do Gerenciamento dos resíduos sólidos



Fonte: Elaboração própria, baseado na PNRS (2010)^[27]

A PNRS institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, devendo ser atribuída de forma individual e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoantes às atribuições de reduzir a quantidade de resíduos sólidos e rejeitos, o desperdício de materiais e impactos ambientais significativos^[27]. Dentro da lei, são especificadas as responsabilidades para cada uma das partes, considerando-as igualmente relevantes, porém não solidárias, ou seja, caso não haja o cumprimento das responsabilidades por uma das partes, a atribuição não passa a ser obrigatória para as outras^[7627].

Dentro das definições de responsabilidade compartilhada, também é colocado como obrigação a estruturação e implementação de sistemas de logística reversa para produtos e embalagens de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes e produtos e componentes eletroeletrônicos. Isto significa que cabe o retorno dos produtos pós-consumo pelo consumidor, independente da coleta pública regular, e o manejo dos resíduos recebidos por parte dos fabricantes, importadores, destruidores e comerciantes^[27]. O esquema da Figura 13 mostra as responsabilidades e a logística dada pela logística reversa no PNRS (2010)^[27].

Figura 13 - Atribuições da logística reversa para produtos acordados pela lei 12.305/2010



Fonte: Elaboração própria, baseado na PNRS (2010)^[27]

2.3.3 A Política Nacional de Resíduos Sólidos e os Resíduos Perigosos

De acordo com a NBR 10.004/2004, resíduos perigosos são resíduos que podem apresentar, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, risco à saúde pública, causando mortalidade, ocorrência de doenças ou aumento delas e riscos ao meio ambiente, caso o resíduo seja gerenciado de maneira errônea^[28].

A PNRS (2010) determina que as pessoas jurídicas que operam com resíduos perigosos a se cadastrarem no Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos^[27]. É necessário também a elaboração de um plano de gerenciamento de

resíduos perigosos e submetê-lo ao órgão ambiental competente, podendo ser inserido no plano de gerenciamento de resíduos sólidos.

Ademais dos resíduos e embalagens exigidos pela lei da logística reversa, comentados anteriormente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos não cita nada referente a resíduos perigosos para pessoa física^[27].

2.3.4 A Política Nacional de Resíduos Sólidos e os REEE

Como mencionado no item 1.7 da PNRS, os resíduos de equipamento elétricos e eletrônicos (REEE) entram no sistema de logística reversa. Isso significa que todas as partes envolvidas no processo de aquisição do produto, ou seja, consumidores, comerciantes/distribuidores e fabricantes/importadores terão responsabilidades no gerenciamento dos REEE. Cabe aos consumidores devolver os produtos para os comerciantes/distribuidores, porém a lei não especifica como deverá ser realizada essa coleta^[27]. Os comerciantes/distribuidores devem enviar os REEE para os fabricantes/importadores para que o rejeito seja encaminhado para disposição final ambientalmente adequada exigida pelo órgão ambiental competente ou pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos^[27].

É necessária atenção aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos pois estes podem apresentar substâncias potencialmente perigosas e nocivas à saúde humana e ao meio ambiente^[27], como por exemplo chumbo, cádmio, arsênio, mercúrio, bifenilas policloradas (PCBs), éter difenil polibromados, entre outras substâncias perigosas^[29].

2.3.5 Critérios para classificação do resíduo pela regulação brasileira

A classificação de materiais como resíduos perigosos depende dos limites impostos pela ABNT NBR 10.004/2004^[28]. Em relação às placas fotovoltaicas, a composição de cada modelo também pode oscilar, classificando, portanto, algumas placas fotovoltaicas como resíduos perigosos e outras não.

A verificação quanto à classificação das placas fotovoltaicas pós-consumo respeita a lista de substâncias consideradas perigosas e os limites máximos permitidos, obtidos pelo ensaio de lixiviação de acordo com a ABNT NBR 10.004^[28]. Este ensaio, definido

pela norma ABNT NBR 10.005^[30], é o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. A Tabela 4 mostra os limites máximos no extrato obtido no ensaio de lixiviação.

Tabela 7 - Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação

Parâmetro	Cód. de identificação	Limite máximo no lixiviado (mg/L)	CAS
Cádmio	DO07	0,5	7440-43-9
Chumbo	DO08	1,0	7439-92-1
Prata	DO12	5,0	7440-22-4
Selênio	DO13	1,0	7782-49-2

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 10.004/2004^[28]

2.3.6 Classificação dos resíduos de painéis fotovoltaicos

Visto que a maioria dos países ainda não criou uma regulamentação específica para os painéis fotovoltaicos, a classificação dada acaba sendo de resíduo domiciliar comum^[10]. Por outro lado, a União Europeia e o Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, já definiram. Enquanto o primeiro mencionado compreende os resíduos de placas fotovoltaicas como REEE, o segundo classifica como resíduo universal.

A Diretiva REEE define os equipamentos elétricos e eletrônicos como equipamentos projetados para uso com uma tensão nominal não superior a 1.000V para corrente alternada e 1.500V para corrente contínua, ou equipamentos dependentes de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos para funcionar adequadamente, ou equipamentos para a geração de tais correntes ou equipamentos para a transferência de tais correntes, ou equipamentos para a medição de tais correntes^[22]. Além disso, cria um gerenciamento para a destinação final desses resíduos sólidos, incluindo as

placas fotovoltaicas, a fim de assegurar a minimização de impactos ambientais significativos e danos à saúde humana, associados aos processos dados pela hierarquia dos resíduos.

Já o resíduo universal é definido como uma categoria de resíduo perigoso que costuma ser gerado por uma grande variedade de estabelecimentos. São exemplos de resíduos universais as baterias, os pesticidas, os equipamentos contendo mercúrio e as lâmpadas de mercúrio. A SB 489, lei californiana que define o tipo de resíduo das placas fotovoltaicas, não especifica como deverá ser a destinação dos resíduos nem qual deve ser o papel dos autores (consumidor final, comerciante, distribuidor, fabricante, importador) na gestão.

No Brasil, tanto a classificação quanto a gestão dos resíduos das placas fotovoltaicas ainda são pouco discutidas. Em 2012, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) publicou a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos^[31] a fim de permitir e facilitar o monitoramento, o controle, a fiscalização e a avaliação da eficiência da gestão e gerenciamento de todos resíduos sólidos nos diversos níveis. Além disso, existe uma proposta de Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a fim de definir a gestão dos REEE^[32], porém não estão ainda incluídos os resíduos de placas fotovoltaicas. Ambos os documentos são muito semelhantes aos arquivos já publicados pela União Europeia (Lista de Resíduos da União Europeia^[33] e Diretiva REEE^[22]).

Portanto, para este estudo, os painéis fotovoltaicos pós consumo serão classificados, no Brasil, como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Assim, não será necessário criar uma nova classificação de resíduos e facilitará o cumprimento da PNRS.

2.4 POLÍTICAS DE DESCARTE: ESTUDOS DE CASO

i. Alemanha

O mercado alemão de placas fotovoltaicas começou a crescer na década de 1990. O mercado de energia solar se desenvolveu rapidamente através de incentivos governamentais que incluíam facilidade no financiamento para aquisição de painéis,

legislação estabelecida para conexão à rede (GD) e tarifa diferenciadas para energia proveniente de fontes limpas^[10]. Dessa forma, a Alemanha já se encontra no estágio em que deve atender as demandas ambientais decorrentes do descarte em massa desses painéis, tornando-se o país que possui o modelo mais concreto de gestão desse tipo de resíduo no mundo.

Os painéis fotovoltaicos pós consumo são enquadrados na legislação nacional alemã como equipamentos Elétricos e Eletrônicos. Esse tipo de resíduo é regulamentado pelo Registro Nacional para Disposição de Equipamentos Elétricos (National Register for Waste Electrical Equipment)^[47], em que uma estância de poder independente (financeiramente e politicamente) denominada Stiftung EAR deve registrar todos os produtores de resíduos eletrônicos.

A Stiftung EAR não possui responsabilidades operacionais, como coletar os painéis ou recicla-los. Suas obrigações incluem coordenar a provisão de containers para disposição de resíduos eletrônicos em toda a Alemanha e tarefas processuais, como realizar relatórios federais com métricas de geração dos resíduos e registrar produtores que estão no mercado^[10]. Já a parte prática de disposição e gerenciamento dos resíduos é definida pela Diretiva REEE de 2015 (que divide a gestão em dois ramos: o mercado Produtor para Consumidor Final (B2C) e Produtor para Produtor (B2B)).

- **Produtor para Consumidor Final (B2C)**

Nesse segmento, encontram-se os produtores de tecnologia de geração solar que vendem seus produtos para pequenos geradores, como por exemplo, casas e condomínios. Há duas possibilidades de descarte nessa categoria. A primeira corresponde àqueles proprietários que desejam descartar seus equipamentos de um modo ativo. Nesse caso, eles devem possuir acesso a pontos de coleta municipais que receberão as placas sem nenhum custo para os proprietários e destinarão para a disposição final. Já a segunda categoria inclui sistemas de logística reversa que recolherão os equipamentos e também o destinarão adequadamente para o descarte (Hoffman, 2008 *apud* IRENA, 2016)^[10].

Ambos os caminhos de descarte possuem os custos financiados pelos produtores que assumem a responsabilidade financeira de acordo com o seu tamanho no mercado. Por exemplo, uma empresa A que possui 10% de todo o mercado alemão de produção

de painéis, deve arcar com 10% dos custos para o gerenciamento e disposição dos produtos, tanto os que já estão quanto os que ainda serão instalados. Assim, a responsabilidade dos descartes B2C é compartilhada em conjunto por todas as empresas que estão no mercado nesse nicho.

Nota-se que esse sistema visa garantir a sustentabilidade econômica e ambiental da gestão adequada do descarte das placas fotovoltaicas. Dessa forma, no custo final para o consumidor, estará embutido o preço para o descarte dos materiais já existente, e os que virão a surgir; pois deve-se considerar as instalações históricas, as placas que serão descartadas antes de atingir a vida útil e as que atingirão o tempo máximo de uso. Além disso, caso uma empresa pare de funcionar por algum motivo, as outras que ficaram no mercado deverão manter os sistemas de descarte, então há também um prêmio de risco atrelado ao valor do painel, para colaborar com a sustentação do sistema em casos de falência das empresas produtoras^[10].

Assim, no preço final há a incidência dos seguintes custos: custo para descartar o que já está instalado (histórico); custo para descartar as placas que falham; custo para descartar as placas que atingirão o final de sua vida útil; e custo do prêmio de risco por falência da empresa produtora^[10].

Por fim, o controle dessa política é feito pela impressão dos códigos de regulamentação nas placas fotovoltaicas, os quais a empresa produtora recebe das agências reguladoras.

- **Produtor para produtor (B2B)**

A relação B2B é definida como sendo os produtores que vendem para grandes produtores de eletricidade ou estabelecimentos com propósito de lucro, como usinas solares ou fábricas. O modo de regulamentação é diferente da primeira analisada, sendo muito mais flexível. Nesse caso, o comprador tem a possibilidade de negociar com o produtor da placa para retirar os produtos ao fim da vida útil desses, negociando o preço contratual para isso; ou, caso prefira, optar por um terceiro que irá garantir a destinação final. Esse esquema garante uma maior eficiência no descarte e uma maior margem de negociação no preço final do painel, pois o custo da disposição pode ser flexibilizado^[10].

ii. Itália

A Itália ainda não chegou na fase em que os resíduos provenientes da geração fotovoltaica se tornaram um problema real. O desenvolvimento nessa área data a partir dos anos 2000, logo, a maior parte das placas ainda não chegou ao fim de sua vida útil^[40].

No entanto, como a Itália faz parte da União Europeia, ela está sob a mesma Diretiva que guia a gestão de resíduos da Alemanha, a Diretiva REEE^[22]. Assim, o compromisso com o descarte adequado e as metas para destinação ambientalmente correta são as mesmas, com grande foco na reciclagem e reuso dos materiais.

Na prática, a Itália busca construir um sistema similar ao alemão, visando garantir o descarte adequado e economicamente viável, mas ainda não possui uma sistematização tão completa quanto o sistema da Alemanha.

De acordo com Paiano (2015)^[40], os produtores de placas devem aderir a um sistema ou consórcio para reciclar as placas e comprovar isso por meio de certificações/atestados que são encaminhados a Agência Nacional de Eletricidade (Guarantor of Electric Services – GES). Apenas com esses documentos, as empresas produtoras recebem permissão para continuar em suas atividades.

Não se encontrou maiores informações sobre esse modelo, como por exemplo, se há separação entre os mercados B2B e B2C, como os consórcios são formados, ou o que será feito com as placas mais antigas cujas empresas produtoras não existem mais. Nota-se que a preocupação com o descarte adequado dos resíduos da energia solar ainda é muito incipiente na Itália.

2.5 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE PLACAS FOTOVOLTAICAS

Os processos de reciclagem de placas fotovoltaicas tanto da primeira como da segunda geração podem ser realizados a partir de técnicas mecânicas, químicas, térmicas e lasers^[34]. Tais processos podem ser feitos em conjunto ou separadamente^[34]. Um exemplo disso é o método desenvolvido por Kang Sukmin et al^[35] que utiliza um solvente orgânico para expandir e dissolver a EVA a fim de separar o vidro temperado das células fotovoltaicas e, em seguida, é feita uma decomposição térmica para remover totalmente a EVA^[35]. A purificação da superfície das células

fotovoltaicas, pode ser realizada através de lasers que separaram as camadas indesejadas de antirreflexo, metalização e certos semicondutores^{[34][36]}. A escolha das técnicas e dos processos utilizados depende, normalmente, do seu custo e da minimização dos impactos ambientais causados^[34].

Atualmente, há inúmeros processos de pretratamento e reciclagem para os diferentes tipos de tecnologias e gerações de placas fotovoltaicas desenvolvidas e em desenvolvimento a nível global. Porém, poucos foram testados e colocados em prática a nível operacional. Os de maior relevância são:

- i. O processo da Deutsche Solar GA para reciclar os painéis de silício cristalinos^[37];
- ii. O processo da First Solar para a reciclagem de painéis filme fino de telureto de cádmio^[37].

Além desses, vale mencionar a PV Cycle, fundada a partir de uma associação entre fabricantes/importadores de placas fotovoltaicas e setores públicos em diferentes países e níveis de governo da Europa^{[10][38]}, a qual também oferece serviços de reciclagem em escala industrial^{[37][38]}.

O processo de tratamento da Deutsche Solar AG operou em escala piloto durante 2003, porém a planta foi desligada devido à falta de recurso, uma vez que a quantidade de placas fotovoltaicas descartadas na época era baixa. Criado na Alemanha e financiado pela empresa SolarWorld AG, o processo de tratamento e reciclagem da Deutsche Solar montado, principalmente, para painéis c-Si, começa com a remoção dos componentes de plástico dos painéis através de um processo térmico. Em seguida, as células fotovoltaicas, o vidro e os metais são separados manualmente. O vidro e os metais, incluindo alumínio, aço e cobre, continuam nos respectivos processos de reciclagem e as células fotovoltaicas são “regravadas” na “bolacha”. Através de uma série de fases químicas, as células fotovoltaicas são limpas, até surgir uma nova “bolacha” de silício. Estas “bolachas” retratadas cumprem os requisitos de padrão de qualidade e podem ser reprocessadas como células de placas fotovoltaicas novas. No caso de células fotovoltaicas quebradas, o silício é recuperado sob a forma de “bolachas” quebradas para cristalização. A eficiência do processo de reciclagem da placa fotovoltaica é de, aproximadamente, 80%^[37], sem considerar o tratamento térmicos dos componentes de plástico. Além disso, recupera-se em média 95% do vidro.

O processo de tratamento para painéis de filme fino de telureto de cádmio da First Solar foi desenvolvido nos Estados Unidos em meados de 1990 e estabelecido em 2003. Em 2007, a planta operou em capacidade máxima de, aproximadamente, 10t/dia. Posteriormente, o processo foi replicado na Alemanha e Malásia. A primeira etapa do processo de tratamento e reciclagem da First Solar é a quebra dos módulos em pedaços grandes e, em seguida, a trituração por um moinho de martelos até atingir pedaços menores que 5mm. Os filmes de semicondutores são removidos através de um processo químico lento (entre 4 e 6 horas). Este processo é feito a partir da adição de ácido sulfúrico fraco e peróxido de hidrogênio no vidro até atingir relação ótima sólido-líquido. Posteriormente, o vidro é separado do líquido em um classificador e direcionado para uma tela de vibração para desprender a EVA do vidro. A EVA é armazenado e coletado enquanto o vidro é levado para limpeza e depositado em contêineres. Os metais, contidos na água de enxague, são precipitados em um procedimento de três etapas: aumento do pH com NaOH; encaminhamento do sólido formado para um filtro de torta de metal enriquecido; os materiais dos semicondutores não refinados são empacotados e encaminhados para outra empresa a fim de serem usados em novos painéis fotovoltaicos. O processo possibilita a recuperação de 90% do vidro e 95% dos semicondutores^{[37][39]}. Telúrio e Cadmio também são recuperados dos semicondutores^[37], sendo de, no mínimo, 80% de Te recuperado^[39]. O processo de reciclagem da First Solar é financiado através da reserva de fundos para a coleta do resíduo e reciclagem no momento da venda do painel.

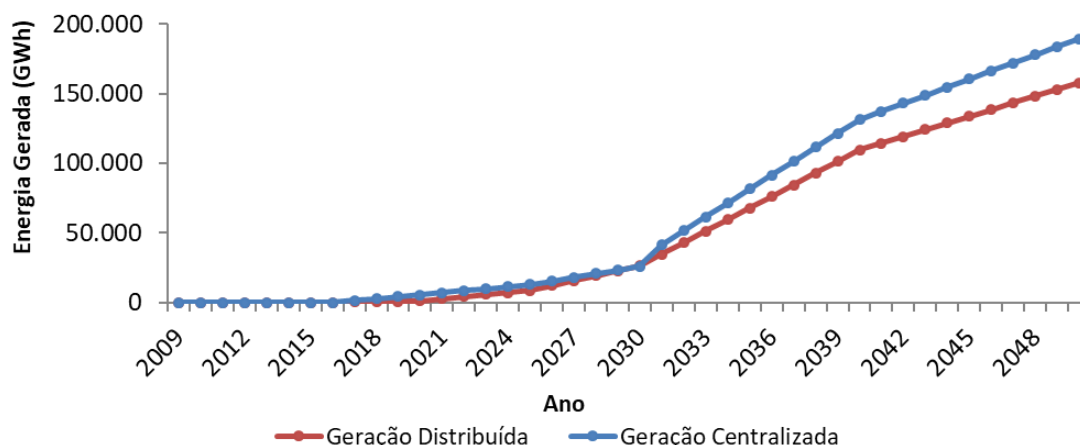
3. ANÁLISE DOS DADOS E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

3.1 CÁLCULO DO NÚMERO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS E MASSA A SER DESCARTADA

Para o cálculo do número de placas que necessitarão de descarte utilizou-se o *market share* de cada tecnologia apresentado na Tabela 26 do Anexo I. Apesar de ser certo que novas tecnologias irão surgir, o Brasil ainda se encontra no estágio de adoção das tecnologias descritas e não há previsão de quando outras tecnologias passarão a ser economicamente mais atrativas que as disponíveis atualmente nem quando serão comercializadas no país. Aliado a isso, dividiu-se a projeção de energia solar entre distribuída e centralizada e, em seguida, cada uma delas foi separada em 5 períodos, com crescimento linear da geração em cada um dos períodos de projeção.

Os períodos foram divididos da seguinte maneira: até 2017, onde os dados já estão disponibilizados; de 2017 a 2025, onde a geração ainda é pouco expressiva; de 2025 a 2030, onde o crescimento começa a acelerar; de 2030 a 2040, onde o sistema está em plena expansão; de 2040 a 2050, onde o crescimento se dá em um ritmo menor. Os resultados da geração produzida por tipo de produção podem ser observados na Figura 14 e em detalhe na Tabela 27 do Anexo I.

Figura 14 - Projeção da geração de energia solar distribuída e centralizada



Fonte: Elaboração própria

A fim de obter o potencial de geração de cada região brasileira, consultaram-se os dados de irradiação solar diária no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006)^[6], mostrados na Figura 15 e agregou-se a estes dados a atual participação de cada Estado nas conexões de geração distribuída, obtido a partir da Nota Técnica nº 0056/2017 da ANEEL (2017)^[50]. A partir do número de conexões de cada Estado, calculou-se a irradiação média deles pela média ponderada de acordo com o número de conexões em cada um. O valor da irradiação média calculado foi de 2024kWh/m²/ano. Entretanto, ao adotar um cenário mais conservativo, utilizou-se a irradiação como metade da média calculada. Portanto, a irradiação adotada foi de 1012kWh/m²/ano. Devido à falta de estudo quanto à evolução de cada estado nas projeções de energia solar, adotou-se a distribuição atual como constante no horizonte deste trabalho. A irradiação diária média por região pode ser observada na Figura 15 e o resultado da irradiação calculada é mostrado na Tabela 9.

Figura 15 - Radiação Solar média diária por região

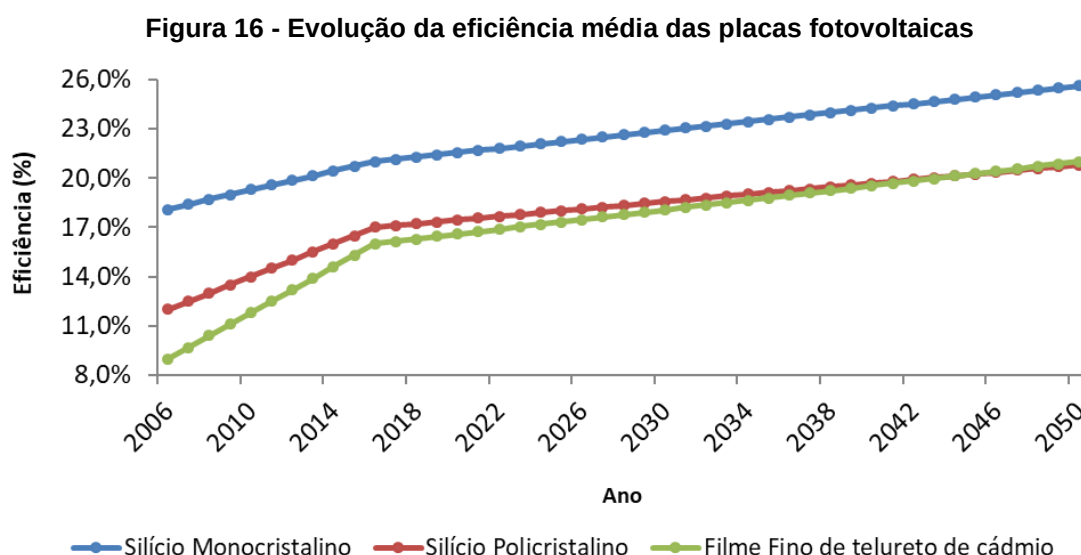
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006)^[6]

Tabela 8 - Irradiação anual média calculada

Estado	Número de Conexões	% do Total	Irradiação Solar Média Usada (kWh/m²/ano)
Todos	10.561	100	1012

Fonte: Elaboração própria

Em seguida, utilizaram-se os dados de eficiência presente no Photovoltaics Report da Fraunhofer ISE (2016)^[10] e no Artigo de Munsell *apud* GTM Research (2014)^[51], que apresenta os dados de eficiência média de cada tecnologia de placa fotovoltaica tratada neste trabalho. Estes documentos também informam a variação da eficiência média das placas nos últimos 10 anos e este dado foi utilizado para traçar uma regressão linear da eficiência de 2006 a 2016, como pode ser observado na Figura 16 e em detalhe na Tabela 28 do Anexo I. A fim de traçar a eficiência média futura, utilizou-se a tabela de eficiência da NREL (2017)^[2] e adotou-se que a eficiência média das tecnologias irá aumentar linearmente até o ano de 2050, igualando a eficiência obtida em laboratório das respectivas tecnologias mais avançadas neste quesito no presente momento.



Fonte: Elaboração própria

A participação de cada tecnologia no mercado foi obtida a partir do estudo End-of-life-management: Solar Photovoltaics Panels realizado pelo IRENA (2016)^[10], que apresenta projeções da distribuição das tecnologias até o ano de 2030. Para o horizonte de 2030-2050, adotou-se que as placas de silício policristalino e monocristalino manterão o ritmo de diminuição de participação no mercado igual ao observado no estudo do IRENA, ou seja, de aproximadamente 4% ao ano, além disso para diferenciar a participação das placas monocristalinas e policristalinas, adotou-se

que a proporção obtida no estudo da Fraunhofer ISE (2016)^[10] será constante, ou seja 73% das placas de silício serão policristalinas e 27% monocristalinas, já para as placas de filme fino de telureto de cádmio adotou-se que sua participação será constante em 5%. O resultado pode ser observado na Tabela 9, na qual é possível observar a participação cada vez mais relevante de outras tecnologias, as quais conforme forem surgindo também devem ter seu descarte planejado.

Tabela 9 - Participação de cada tecnologia no total de energia produzida

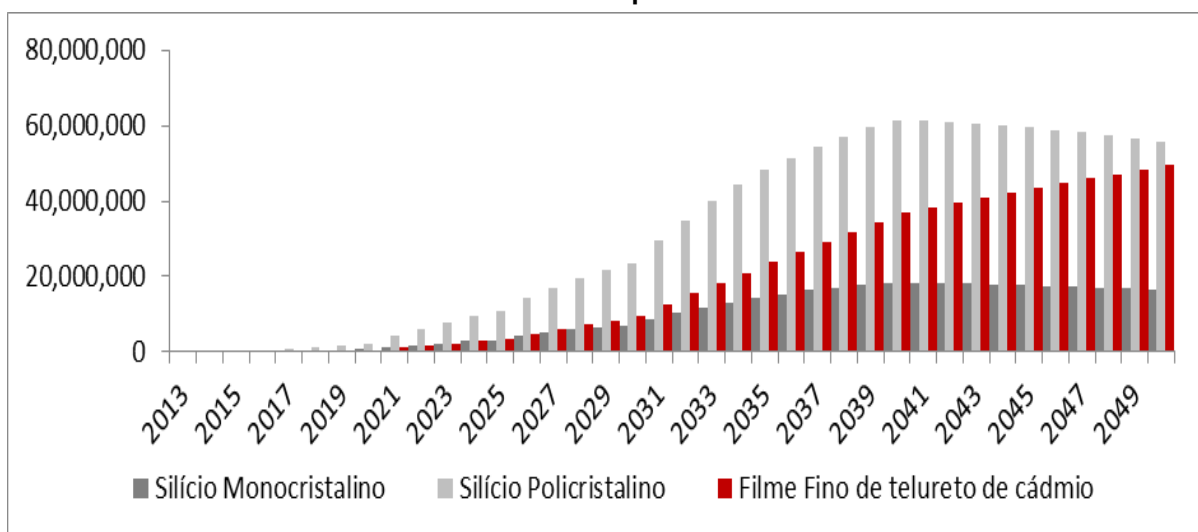
Tecnologia	Participação no mercado (%)				
	2014	2020	2030	2040	2050
Silício Policristalino	68,0	53,6	32,8	21,8	14,5
Silício Monocristalino	25,0	19,7	12,0	8,0	5,3
Filme Fino de Telureto de Cádmio	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Outros	2,0	21,7	50,2	65,2	75,2

Fonte: Elaboração própria

A área média das placas foi obtida através das placas disponíveis atualmente no mercado brasileiro. Constatou-se que as placas de silício com cerca de 300W possuem área de aproximadamente 1,95m² e as placas de filme fino de telureto de cádmio com cerca de 100W possuem área de aproximadamente 0,75m².

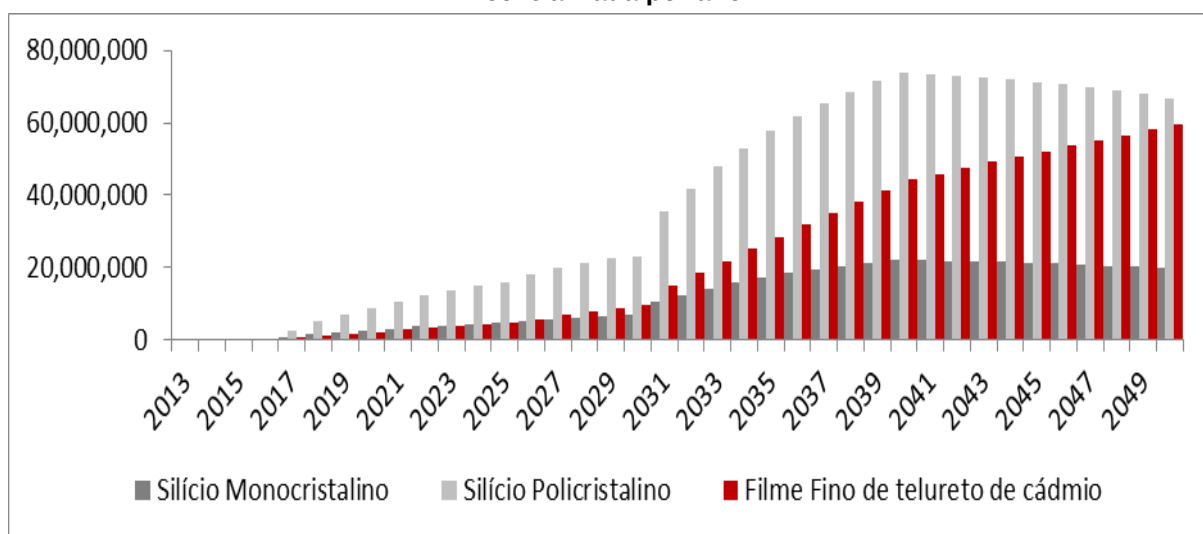
A partir do agrupamento das informações descritas nesta seção é possível calcular o número de placas em operação por ano para fornecer a quantidade de energia prevista. O resultado para geração distribuída pode ser observado na Figura 17 e para geração centralizada na Figura 18, e em detalhe respectivamente na Tabela 29 e na Tabela 30 do Anexo I.

Figura 17 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas em operação para geração distribuída por ano



Fonte: Elaboração própria

Figura 18 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas em operação para geração centralizada por ano



Fonte: Elaboração própria

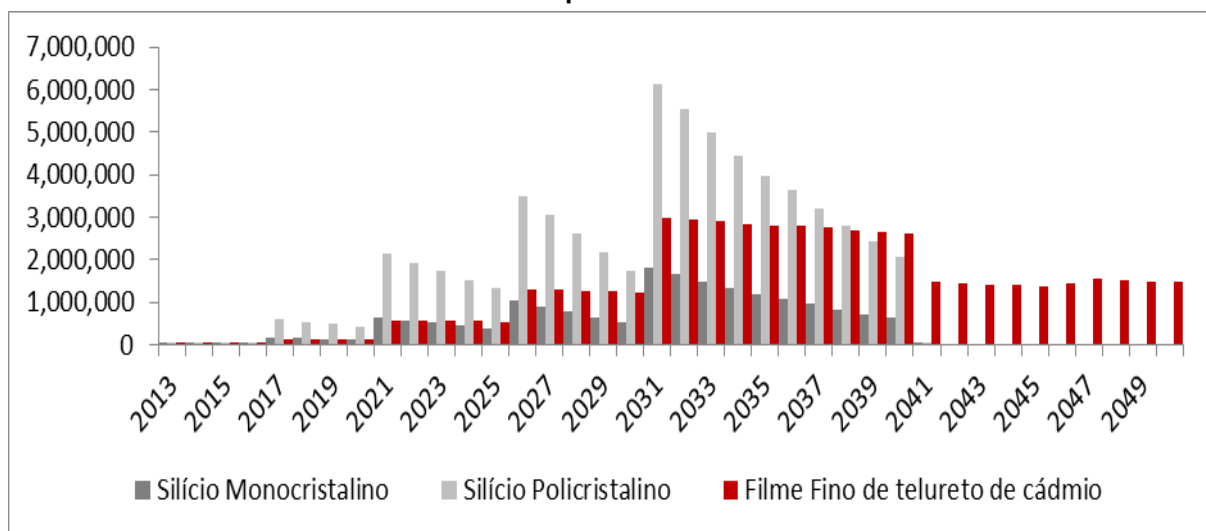
A fim de calcular o número de placas fotovoltaicas a serem descartadas por ano, utilizou-se a vida útil da placa como 30 anos e, além disso, considerou-se que 0,5% das placas são danificadas durante o transporte ou instalação; outras 0,5% quebrarão com 2 anos de funcionamento devido à instalação de forma incorreta; outras 2% quebrarão depois de 10 anos por problemas técnicos; outras 4% quebrarão depois de

15 anos por problemas técnicos. Estes valores de descarte antecipado foram adotados segundo a mesma metodologia utilizada no estudo do IRENA (2016)^[10]. O número de placas que devem ser compradas para suprir as projeções de geração distribuída pode ser observado na Figura 19 e de geração centralizada na Figura 20, e em detalhe na Tabela 31 e na Tabela 32 do Anexo I.

Pode-se observar que na mudança entre os intervalos que foram definidos para os períodos de geração de energia há picos na necessidade de compra de placas fotovoltaicas devido à entrada em períodos de maior demanda. Por outro lado, ao analisar um período específico cuja variação do aumento de energia é constante, verifica-se que o número de placas compradas diminui a cada ano. Isto ocorre em virtude do aumento da eficiência das placas e da diminuição da participação das tecnologias consideradas neste trabalho por consequência do surgimento de novas tecnologias.

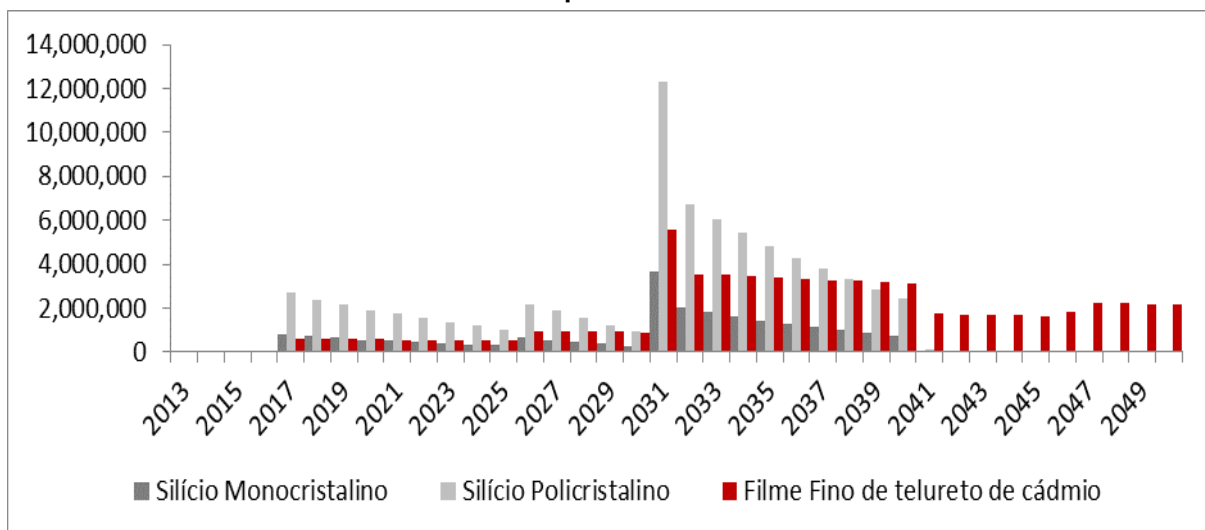
Nota-se que a partir do ano de 2042 não há mais necessidade de instalação de novas placas de silício para que estas tecnologias tenham a participação estimada no mercado.

Figura 19 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração distribuída compradas por ano



Fonte: Elaboração própria

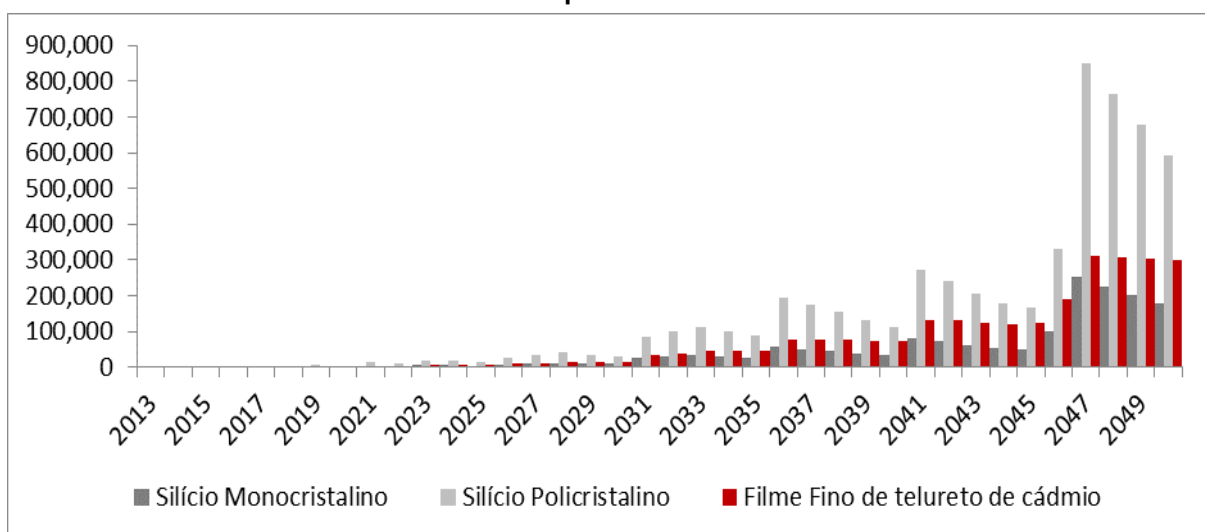
Figura 20 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração centralizada compradas por ano



Fonte: Elaboração própria

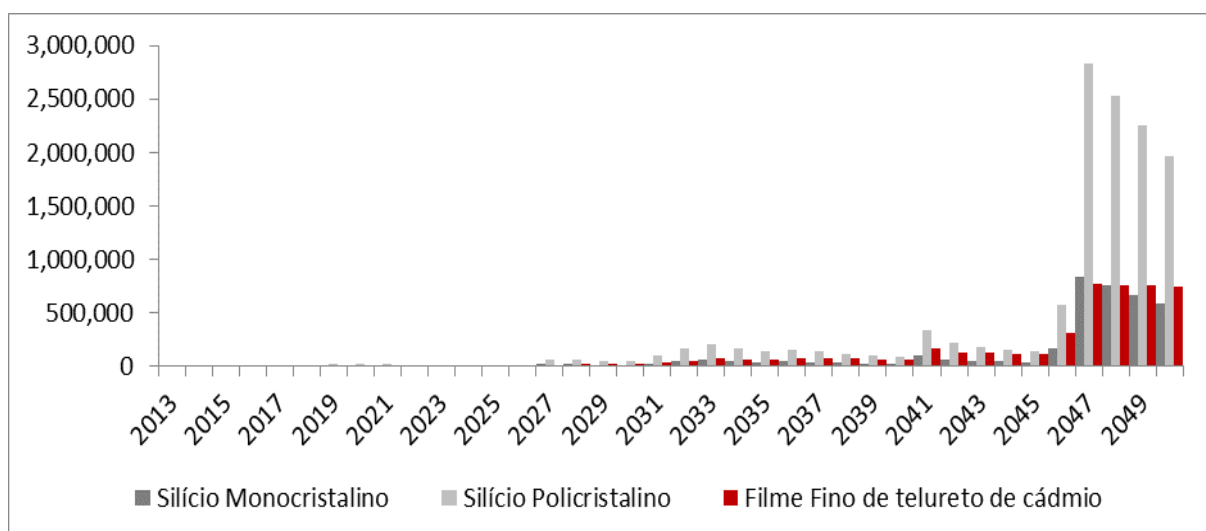
O número de placas a ser descartada por ano considerando as premissas de descarte adotadas neste trabalho para geração distribuída podem ser observados na Figura 21 e para geração centralizada na Figura 22, e em detalhe na Tabela 33 e na Tabela 34 do Anexo I. Percebe-se que nos anos anteriores ao final do escopo deste projeto o descarte de placas fotovoltaicas cresce abruptamente, o que significa que a avaliação do descarte deve ser constante para observar cenários futuros.

Figura 21 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração distribuída descartadas por ano



Fonte: Elaboração própria

Figura 22 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas para geração centralizada descartadas por ano



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 10 apresenta os valores acumulados do número de placas que serão descartadas até o horizonte de 2050. As placas de silício monocristalino e policristalino foram agrupadas em um único grupo. Pode-se observar que haverá cerca de 300 milhões de placas fotovoltaicas produzidas com as tecnologias estudadas, das quais 32 milhões sofrerão descarte até o ano de 2050. Devido à este elevado volume, nota-se a importância de se criar um plano de descarte para este tipo material.

Tabela 10 - Estimativa do número de placas fotovoltaicas descartadas até 2050

	Número de Placas Fotovoltaicas	
	Geração Distribuída	Geração Centralizada
Silício Monocristalino/ Policristalino	7.526.885	16.952.726
% do total produzido	9,2	17,2
Filme Fino de Telureto de Cádmio	2.723.974	4.836.972
% do Total produzido	5,2	7,5

Fonte: Elaboração própria

Por fim, para calcular a massa de cada componente a ser descartado, utilizou-se as massas típicas de painéis reportados no estudo do IRENA (2016)^[10]. O peso médio

de um painel de silício é de aproximadamente 18,6 kg e do painel de filme fino 12kg^[10].

Aliado a isto, utilizou-se o percentual de cada componente mostrado na Tabela 2.

As Tabela 11 e Tabela 12 mostram a massa a ser descartada de cada componente das placas de silício e filme fino, respectivamente.

Por fim, observa-se que a massa total de placas fotovoltaicas pós consumo gerada até 2050 será de, aproximadamente, 550 mil toneladas.

Tabela 11 - Estimativa da massa descartada de placas de silício separada por componentes até 2050

Materiais	Massa Descartada (t)	
	Geração Distribuída	Geração Centralizada
Vidro	103.824	233.842
Polímero	15.834	35.663
Alumínio	14.420	32.478
Silício	4.690	10.563
Cobre	798	1.797
Prata	14	32
Estanho	168	378
Zinco	168	378
Chumbo	84	189
Total	140.000	315.321

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Estimativa da massa descartada de placas de filme fino de telureto de cádmio silício separada por componentes até 2050

Materiais	Massa Descartada (t)	
	Geração Distribuída	Geração Centralizada
Vidro	31.053	55.141
Polímero	1.144	2.032
Alumínio	114	203
Cobre	327	580
Zinco	3	6
Telúrio	23	41
Cádmio	23	41
Total	32.688	58.044

Fonte: Elaboração própria

4. ALTERNATIVAS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

4.1 PROCESSOS E CUSTOS DE RECICLAGEM

Para este trabalho, serão propostos três cenários hipotéticos relacionados ao tratamento adequado de acordo com as normas dadas pela PNRS e a reciclagem das placas fotovoltaicas.

No Cenário A, assume-se que descarte será realizado diretamente no aterro sanitário, portanto não haverá custos de tratamento ou reciclagem.

No Cenário B, haverá tratamento e reciclagem, porém, o mínimo exigido pelos órgãos competentes. O tratamento e a reciclagem das placas serão feitos em uma planta de reciclagem de vidro. Haverá controle apenas quanto a disposição do cádmio e chumbo e a quantidade de vidro recuperado.

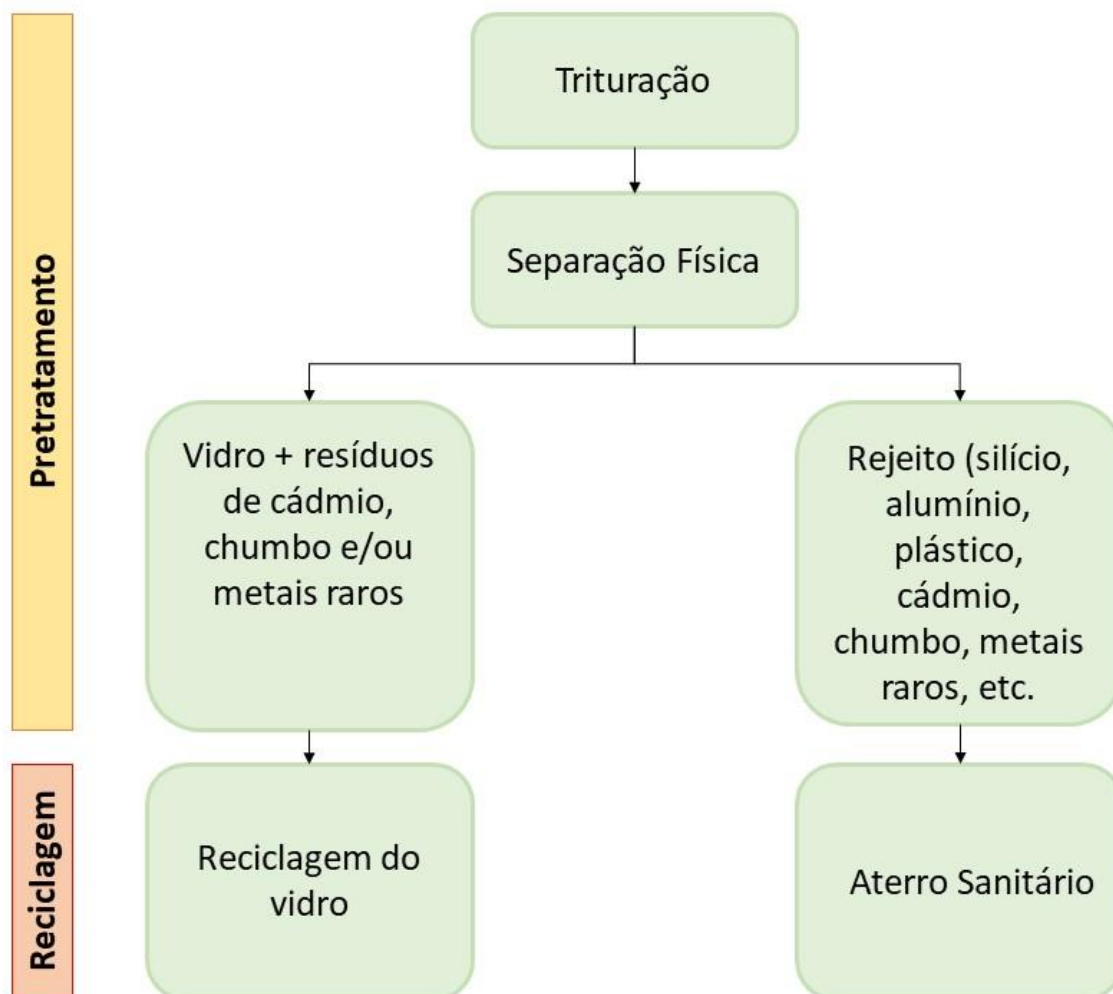
No Cenário C, haverá um processo mais elaborado de reciclagem das placas. O custo será maior, mas será recuperada uma maior quantidade e diversidade de materiais.

O sistema de reciclagem do Cenário B terá somente um processo de separação. Primeiramente, as placas serão trituradas e, em seguida, encaminhadas para um processo de separação física. O vidro é separado dos outros materiais e reciclado. Os outros materiais, tais como, alumínio, vidro, cádmio, chumbo e metais preciosos serão considerados rejeitos e dispostos em aterros sanitários. Os materiais potencialmente perigosos, chumbo e cádmio, não serão recuperados e processados para reutilização, porém serão tratados de uma forma que as possibilidades de sua entrada descontrolada na natureza, contaminando o solo e o ar, sejam eliminadas. A Figura 23 mostra o esquema do processo de reciclagem simples.

Já o sistema de reciclagem do Cenário C, representado pela Figura 24, terá mais processos envolvidos que o Cenário B. A separação física é feita após o processo de trituração. Em seguida, os materiais são levados para a separação térmica a fim de recuperar ao máximo os metais. Os materiais dos interconectores tais como a placa do cabo e o fio da conexão também são separados. Assim, o telúrio, cobre, prata, e

outros metais são processados para reuso. O vidro, alumínio e silício são encaminhados para a reciclagem. O rejeito será disposto em aterro sanitário. A possibilidade de contaminação pelo cádmio e chumbo também é eliminada neste tratamento.

Figura 23 - Processo de tratamento e reciclagem de vidro - Cenário B



Fonte: Adaptado de BIO Intelligence Service (2011)^[37]

Figura 24 - Processo de tratamento e reciclagem de vidro e metais - Cenário C



Fonte: adaptado de BIO Intelligence Service (2011)^[37]

A receita dos materiais recuperados no Cenário A é assumida como zero e baixa no Cenário B. Já no Cenário C, a receita será um pouco maior uma vez que há uma maior variedade de materiais recuperados. O preço de mercado aplicado foi de 2016 e 2017 para a estimativa do potencial de receita bruta da reciclagem. É de conhecimento que os valores de mercado para cada material podem variar, porém, para este trabalho, optou-se por fixá-los para verificar e tentar representar a situação das placas fotovoltaicas pós consumo em 2050.

Os dados de eficiência do sistema de recuperação e reciclagem dos materiais das placas fotovoltaicas pós consumo foram retirados do estudo realizado por Paiano^[40]. Para a recuperação do vidro, utiliza-se 95% de eficiência. Para o alumínio, a eficiência de recuperação é de 100%. Recupera-se silício, telúrio e cobre com taxas

respectivamente de, 81%, 87,5% e 89%. Em relação aos metais preciosos, considera-se somente a prata com um valor de 40% de eficiência de recuperação.

O potencial de redução de peso dos painéis fotovoltaicos ao longo dos anos não foi considerado, ainda que as tendências indiquem uma diminuição adicional do tamanho e peso de painéis fotovoltaicos, a extensão exata e a natureza dessa mudança são difíceis de avaliar. A porcentagem de metais preciosos encontrados em módulos fotovoltaicos também pode diminuir no futuro devido à sua escassez e, conseqüentemente, ao aumento de preço, além da possibilidade de haver um desenvolvimento de materiais substitutos. Logo, devido à incerteza dessa tendência, isso não foi considerado na análise atual.

Além disso, existem métodos mais eficientes de recuperação dos componentes das placas fotovoltaicas e é uma tendência futura de serem aplicados em escala industrial. Porém, os custos para esses procedimentos não foram divulgados em seus estudos e tampouco há uma previsão de quando serão testados em escalas piloto ou industrial. Por isso, tanto a eficiência dos métodos quanto os custos serão iguais ao longo dos anos.

Os valores de mercado para os materiais foram obtidos em diferentes referências. Os preços do silício e do vidro foram obtidos no estudo realizado por D'Adamo (2017)^[41], o preço do telúrio foi obtido através da análise realizada pela Argus (2016)^[42], os preços do alumínio, cobre e prata foram obtidos através da London Metal Exchange^[43] no dia 11/12/2017 e a cotação do dólar de R\$3,30/US\$ foi obtida no site do Banco Central do Brasil^[44], no dia 11/12/2017. A Tabela 13 mostra os dados de eficiência para cada material e seus respectivos valores de venda.

Tabela 13 - Eficiência de recuperação de materiais após o processo de tratamento e reciclagem.

Material	Eficiência de recuperação (%)	Valores de Mercado (R\$/t)
Vidro	95	396
Alumínio	100	6.930
Silício	81	5.544
Telúrio	87,5	211.200
Cobre	89	22.440
Prata	40	52.140

Fonte: adaptado de Paiano^[40]

A eficiência de recuperação do vidro tanto no Cenário B quanto no Cenário C será considerada igual.

Os custos dos processos de tratamento foram obtidos através do BIO Intelligence Service^[37]. Em relação aos custos de disposição final, o rejeito será aterrado em Aterro Sanitário Classe I. De acordo com o estudo do Engenheiro Pablo Ribeiro Dias (2015), as placas fotovoltaicas são consideradas resíduos perigosos uma vez que possuem uma quantidade de chumbo acima do limite da NBR 10.004^[36]. Assim, os custos para o aterro de classe 1 é, em média, R\$400/t^[46].

Em relação aos processos de tratamento, não foi inserido nenhum custo para o Cenário A, uma vez todo o resíduo é aterrado. No Cenário B, o valor de tratamento e reciclagem é de R\$97,50/t e é igual tanto para placas de silício monocristalino e policristalinos quanto para placas de filme fino de telureto de cádmio. Para o Cenário C, o custo para as placas de silício monocristalino e policristalinos é de R\$546,00/t e, para as placas de filme fino de telureto de cádmio, o custo é de R\$464,10/t^[37]. A Tabela 14 mostram os valores para cada cenário adotado.

Os valores referentes ao investimento inicial de construção da planta de tratamento e as respectivas máquinas necessárias para o funcionamento dos sistemas não foram consideradas nesse estudo.

Tabela 14 - Custos de tratamento e disposição final para cada cenário considerado

Cenário A		
Placa Fotovoltaica	Custo de tratamento (R\$/t)	Custo de Disposição - Aterro Classe 1 (R\$/t)
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 0,00	R\$ 400,00
Filme Fino de Telureto de Cádmio	R\$ 0,00	R\$ 400,00
Cenário B		
Placa Fotovoltaica	Custo de tratamento (R\$/t)	Custo de Disposição - Aterro Classe 1 (R\$/t)
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 97,50	R\$ 400,00
Filme Fino de Telureto de Cádmio	R\$ 97,50	R\$ 400,00
Cenário C		
Placa Fotovoltaica	Custo de tratamento (R\$/t)	Custo de Disposição - Aterro Classe 1 (R\$/t)
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 546,00	R\$ 400,00
Filme Fino de Telureto de Cádmio	R\$ 464,10	R\$ 400,00

Fonte: Elaboração própria

A possível diminuição dos custos de processos de tratamento devido ao aumento da quantidade de placas fotovoltaicas descartadas ao longo dos anos não foi considerada nesse estudo. Devido à incerteza da natureza e extensão das flutuações dos custos devido a escala da planta e à aplicação de novas técnicas de reciclagem, este estudo

utiliza dados atualmente disponíveis para representar o que poderia ser imaginável em 2050. Portanto, ao avaliar os custos de reciclagem de painéis fotovoltaicos, os custos de pesquisa e desenvolvimento necessários para o avanço de novas técnicas de reciclagem não foram considerados.

4.2 CÁLCULO DO VALOR GERADO COM A RECICLAGEM

Tendo em vista o volume de placas a serem descartadas, a seguir analisou-se a viabilidade econômica de realizar os processos de reciclagem encontrados no mercado. Para se realizar esta análise, primeiramente estimou-se o custo total da reciclagem, utilizando-se os valores encontrados no estudo da European Commission DG Environment (2011)^[52] e a cotação do euro disponível no site no Banco Central do Brasil em 11/12/2017^[44]. Os valores podem ser observados na Tabela 15 e Tabela 16, nas quais é possível ver que para se efetuar o processo de reciclagem nos painéis descartados até 2050 haverá um custo superior a R\$600 milhões caso seja realizada a reciclagem de vidro e metais e superior a R\$370 milhões para a reciclagem somente de vidro. Estes valores são relevantes e mostram a necessidade de se planejar o descarte das placas fotovoltaicas, pois se não houver um orçamento para cobrir este custo acabará sendo inviável arcar com valores desta magnitude.

Tabela 15 - Estimativa do custo de reciclagem de vidro e metais das placas fotovoltaicas

	Massa Total (t)	Custo Reciclagem (€/t)	Custo Total (MM €)	Cotação (R\$/€)	Custo Total (MM R\$)
Geração Distribuída					
Silício Monocristalino/ Policristalino	140.000	€ 290,00	€ 40,60	3,90	R\$ 158,3
Filme fino de telureto de cádmio	32.688	€ 269,00	€ 8,79	3,90	R\$ 34,3
Geração Centralizada					
Silício Monocristalino/ Policristalino	315.321	€ 290,00	€ 91,44	3,90	R\$ 356,6
Filme fino de telureto de cádmio	58.044	€ 269,00	€ 15,61	3,90	R\$ 60,9

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 - Estimativa do custo de reciclagem de vidro das placas fotovoltaicas

	Massa Total (t)	Custo Reciclagem (€/t)	Custo Total (MM €)	Cotação (R\$/€)	Custo Total (MM R\$)
Geração Distribuída					
Silício Monocristalino/ Policristalino	140.000	€ 175,00	€ 24,50	3,90	R\$ 95,6
Filme fino de telureto de cádmio	32.688	€ 175,00	€ 5,72	3,90	R\$ 22,3
Geração Centralizada					
Silício Monocristalino/ Policristalino	315.321	€ 175,00	€ 55,18	3,90	R\$ 215,2
Filme fino de telureto de cádmio	58.044	€ 175,00	€ 10,16	3,90	R\$ 39,6

Fonte: Elaboração própria

A seguir, calculou-se o valor que seria gasto descartando as placas fotovoltaicas pós consumo em aterros de Classe I. É possível observar na Tabela 17 e Tabela 18 que este custo é relativamente elevado se não for realizado nenhum processo de reciclagem, entretanto, para as placas de filme fino de telureto de cádmio, utilizar a reciclagem completa ao invés da reciclagem apenas do vidro ou de somente aterrar os resíduos apresenta reduções significativas no custo estimado do aterro.

Tabela 17 - Estimativa do custo de aterrar o rejeito das placas fotovoltaicas usadas na geração distribuída

	Massa Aterrada (t)	Preço Aterro (R\$/t)	Custo (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino			
Sem Reciclagem	140.000	R\$ 400	R\$ 56,0
Reciclagem Básica	41.367	R\$ 400	R\$ 16,5
Reciclagem Avançada	22.432	R\$ 400	R\$ 9,0
Filme fino de telureto de cádmio			
Sem Reciclagem	32.688	R\$ 400	R\$ 13,1
Reciclagem Básica	3.187	R\$ 400	R\$ 1,3
Reciclagem Avançada	2.762	R\$ 400	R\$ 1,1

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 - Estimativa do custo de aterrar o rejeito das placas fotovoltaicas usadas na geração centralizada

	Massa Aterrada (t)	Preço Aterro (R\$/t)	Custo (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino			
Sem Reciclagem	315.321	R\$ 400	R\$ 126,1
Reciclagem Básica	93.171	R\$ 400	R\$ 37,3
Reciclagem Avançada	50.525	R\$ 400	R\$ 20,2
Filme fino de telureto de cádmio			
Sem Reciclagem	58.044	R\$ 400	R\$ 23,2
Reciclagem Básica	5.660	R\$ 400	R\$ 2,3
Reciclagem Avançada	4.905	R\$ 400	R\$ 2,0

Fonte: Elaboração própria

Estimou-se o quanto seria gerado de receita através da venda dos materiais recuperados com a reciclagem. Pode-se observar um potencial de geração de receita de aproximadamente R\$640 milhões com a reciclagem de vidro e metais enquanto, para a reciclagem somente de vidro, o valor seria cerca de R\$160 milhões, uma quantia substancialmente menor, uma vez que os metais são considerados rejeitos e dispostos em aterro sanitário.

Tabela 19 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro e metais dos materiais usados na geração distribuída

Materiais	Massa Gerada (t)	%Recuperado	Massa Recuperada (t)	Preço (\$/t)	Receita (MM \$)	Cotação (R\$/ \$)	Receita (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino							
Vidro	103.824	95%	98.633	\$ 120	\$ 11,8	3,30	R\$ 39,1
Alumínio	14.420	100%	14.420	\$ 2.100	\$ 30,3	3,30	R\$ 99,9
Silício	4.690	81%	3.799	\$ 1.680	\$ 6,4	3,30	R\$ 21,1
Cobre	798	89%	710	\$ 6.800	\$ 4,8	3,30	R\$ 15,9
Prata	14	40%	6	\$ 15.800	\$ 0,1	3,30	R\$ 0,3
Total	123.746		117.568				R\$ 176,3
Filme fino de telureto de cádmio							
Vidro	31.053	95%	29.501	\$ 120	\$ 3,5	3,30	R\$ 11,7
Alumínio	114	100%	114	\$ 2.100	\$ 0,2	3,30	R\$ 0,8
Cobre	327	89%	291	\$ 6.800	\$ 2,0	4,30	R\$ 8,5
Telúrio	23	87,5%	20	\$ 64.000	\$ 1,3	5,30	R\$ 6,8
Total	31.517		29.926				R\$ 27,8

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro e metais dos materiais usados na geração centralizada

Materiais	Massa Gerada (t)	%Recuperado	Massa Recuperada (t)	Preço (\$/t)	Receita (MM \$)	Cotação (R\$/ \$)	Receita (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino							
Vidro	233.842	95%	222.150	\$ 120	\$ 26,7	3,30	R\$ 88,0
Alumínio	32.478	100%	32.478	\$ 2.100	\$ 68,2	3,30	R\$ 225,1
Silício	10.563	81%	8.556	\$ 1.680	\$ 14,4	3,30	R\$ 47,4
Cobre	1.797	89%	1.599	\$ 6.800	\$ 10,9	3,30	R\$ 35,9
Prata	32	40%	13	\$ 15.800	\$ 0,2	3,30	R\$ 0,7
Total	278.712		264.796				R\$ 397,0
Filme fino de telureto de cádmio							
Vidro	55.141	95%	52.384	\$ 120	\$ 6,3	3,30	R\$ 20,7
Alumínio	203	100%	203	\$ 2.100	\$ 0,4	3,30	R\$ 1,4
Cobre	580	89%	516	\$ 6.800	\$ 3,5	3,30	R\$ 11,6
Telúrio	41	87,5%	36	\$ 64.000	\$ 2,3	3,30	R\$ 7,6
Total	55.965		53.139				R\$ 41,3

Fonte: Elaboração própria

Tabela 21 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro dos materiais usados na geração distribuída

Materiais	Massa Gerada (t)	%Recuperado	Massa Recuperada (t)	Preço (\$/t)	Receita (MM \$)	Cotação (R\$/ \$)	Receita (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino							
Vidro	103.824	95%	98.633	\$ 120	\$ 11,8	3,30	R\$ 39,1
Total	103.824		98.633				R\$ 39,1
Filme fino de telureto de cádmio							
Vidro	31.053	95%	29.501	\$ 120	\$ 3,5	3,30	R\$ 11,7
Total	31.053		29.501				R\$ 11,7

Fonte: Elaboração própria

Tabela 22 - Estimativa da receita gerada pela reciclagem de vidro dos materiais usados na geração centralizada

Materiais	Massa Gerada (t)	%Recuperado	Massa Recuperada (t)	Preço (\$/t)	Receita (MM \$)	Cotação (R\$/ \$)	Receita (MM R\$)
Silício Monocristalino/ Policristalino							
Vidro	233.842	95%	222.150	\$ 120	\$ 26,7	3,30	R\$ 88,0
Total	233.842		222.150				R\$ 88,0
Filme fino de telureto de cádmio							
Vidro	55.141	95%	52.384	\$ 120	\$ 6,3	3,30	R\$ 20,7
Total	55.141		52.384				R\$ 20,7

Fonte: Elaboração própria

Por fim, subtraiu-se da receita os custos de reciclagem e aterro para se obter o lucro bruto ou prejuízo projetado em cada um dos cenários estudados. Pode-se observar que o cenário sem reciclagem é o pior do ponto de vista econômico para as placas de filme fino de telureto de cádmio devido ao preço de mercado do telúrio, já para as placas de silício os resultados acabam sendo melhores do que recuperar apenas o vidro, mostrando que a recuperação apenas deste material neste tipo de placa não é interessante, dado que o vidro é um material inerte e abundante. Analisando o resultado do processo de reciclagem de vidro e metais é possível observar que para as placas de silício esta é a melhor opção dado que é o único cenário no qual há lucro. Nas placas de filme fino de telureto de cádmio quando se soma o custo para tratar o

resíduo proveniente da geração distribuída e centralizada juntos, conclui-se que realizar a reciclagem de vidro e metais é mais vantajosa (apenas do maior custo).

Tabela 23 - Lucro estimado sem a reciclagem das placas fotovoltaicas

	Custo Reciclagem (MM R\$)	Custo Aterro (MM R\$)	Receita Materiais (MM R\$)	Lucro (MM R\$)
Geração Distribuída				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 0,0	R\$ 56,0	R\$ 0,0	-R\$ 56,0
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 0,0	R\$ 13,1	R\$ 0,0	-R\$ 13,1
Geração Centralizada				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 0,0	R\$ 126,1	R\$ 0,0	-R\$ 126,1
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 0,0	R\$ 23,2	R\$ 0,0	-R\$ 23,2

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24 - Lucro estimado com a reciclagem de vidro das placas fotovoltaicas

	Custo Reciclagem (MM R\$)	Custo Aterro (MM R\$)	Receita Materiais (MM R\$)	Lucro (MM R\$)
Geração Distribuída				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 95,6	R\$ 16,5	R\$ 39,1	-R\$ 73,0
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 22,3	R\$ 1,3	R\$ 11,7	-R\$ 11,9
Geração Centralizada				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 215,2	R\$ 37,3	R\$ 88,0	-R\$ 164,5
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 39,6	R\$ 2,3	R\$ 20,7	-R\$ 21,2

Fonte: Elaboração própria

Tabela 25 - Lucro estimado com a reciclagem de vidro e metais das placas fotovoltaicas

	Custo Reciclagem (MM R\$)	Custo Aterro (MM R\$)	Receita Materiais (MM R\$)	Lucro (MM R\$)
Geração Distribuída				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 158,3	R\$ 9,0	R\$ 176,3	R\$ 9,0
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 34,3	R\$ 1,1	R\$ 27,8	-R\$ 7,6
Geração Centralizada				
Silício Monocristalino/ Policristalino	R\$ 356,6	R\$ 20,2	R\$ 397,0	R\$ 20,2
Filme fino de telureto de cádmio	R\$ 60,9	R\$ 2,0	R\$ 41,3	-R\$ 21,5

Fonte: Elaboração própria

Tendo em vista os cenários analisados, recomenda-se a realização da reciclagem avançada tanto das placas de silício quanto das de filme fino de telureto de cádmio, uma vez que no primeiro grupo há lucro realizando a reciclagem e no segundo é o cenário que daria o menor prejuízo^[37]. Além disso a reciclagem avançada é a que possui menores impactos ao meio ambiente^[52] e que possuem maiores chances de se tornarem mais rentáveis devido ao aumento do preço dos metais.

5. POLÍTICAS DE DESCARTE

5.1 PREMISSAS PARA A POLÍTICA DE DESCARTE

A elaboração de um sistema adequado de descarte para placas fotovoltaicas é uma atividade multidisciplinar, que deve considerar diferentes aspectos. Dentre eles, estão as particularidades geográficas e socioculturais do Brasil, com as dificuldades intrínsecas de um país de dimensões continentais, em desenvolvimento e com baixo grau educacional. Além da dimensão sociocultural, considera-se aspectos legais e econômicos que devem ser incutidos nesse sistema, caso contrário não haverá possibilidades reais para a sua implantação. Nos itens a seguir, discute-se cada um desses desafios e como eles impactam na criação de métodos para o descarte desse material.

1) Questões geográficas e socioculturais: impacto na Logística Reversa

O Brasil possui a quinta maior área superficial do mundo, com diferenças culturais e regionais significativas entre os seus mais de 5.000 municípios^[9]. Nesse contexto, há diferentes cenários para o uso dos painéis, que vão desde proprietários agrícolas que implantam pequenos geradores para suas fazendas, passando por painéis instalados em residências no meio urbano, até comunidades isoladas na Amazônia beneficiadas por programas como o Luz para Todos^[45]. Adicionando as mais de 9.000 unidades de micro geração espalhadas, há uma situação extremamente complexa para a logística reversa e destinação final das placas que devem ser descartadas. Portanto, seria pouco provável estabelecer um sistema de gerenciamento centralizado que fosse responsável pela coleta e destinação de todos os resíduos gerados nessas diversas localidades.

Além da dificuldade geográfica, há questões relacionadas com a penetração da educação ambiental e da infraestrutura necessária para a execução de procedimentos de reciclagem e disposição final de resíduos sólidos. Por exemplo, o cenário atual da reciclagem no Brasil indica que apenas 18% dos municípios possuem coleta

seletiva^[55], o que representa um grande descaso do poder público com a questão ambiental. Dessa forma, espera-se que a implementação de um sistema para o descarte das placas fotovoltaicas pós consumo encontre adversidades semelhantes para o seu funcionamento, mas deve-se ressaltar a importância desse programa devido aos componentes de caráter perigoso desse tipo de resíduo.

2) Questões Legais: Responsabilidade compartilhada e direito fundamental ao meio ambiente

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010) estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos^[55]. Em termos práticos, essa responsabilidade é caracterizada por dois instrumentos: a logística reversa e a destinação final dos resíduos. Segundo a PNRS, cabe ao gerador direto do resíduo o seu gerenciamento, incluindo o recolhimento remanescente dos produtos após o uso e correta destinação final (Art. 31 inciso III). Além disso, a lei explicita a necessidade de logística reversa para os resíduos eletrônicos e seus componentes, como é o caso das placas fotovoltaicas conforme classificação estabelecida previamente.

Já o Artigo 225 da Constituição Federal de 1988^[53] estabelece que

(...) todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e de preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Dessa forma, percebe-se que um meio ambiente saudável é direito fundamental de todos, bem como a necessidade de um desenvolvimento sustentável que permita às próximas gerações se desenvolverem adequadamente.

Portanto, pelo contexto legal apresentado, tem-se que a PNRS obriga os produtores (e importadores) de painéis fotovoltaicos a terem um papel decisivo na articulação de um sistema de logística reversa, possuindo responsabilidades legais civis e administrativas caso não realizem esse procedimento. Além disso, a CF classifica o direito ao meio ambiente como fundamental, de todos e cuja a responsabilidade é tanto do Poder Público como da coletividade, com a finalidade de propiciar um desenvolvimento sustentável para gerações presentes e futuras. Assim, cria-se um

contexto legal favorável à construção de um sistema eficaz para o gerenciamento dos resíduos provenientes dos painéis fotovoltaicos.

3) Questões de mercado

A energia solar teve um crescimento no Brasil nos últimos anos. A RN 482 da ANEEL alavancou a proliferação de unidades micro geradoras de tal modo que mais de 9000 novas unidades foram instaladas em menos de 8 anos. Aliado à esse fato, à construção de novas usinas de grande porte fez com que a energia solar tivesse o maior crescimento relativo dos últimos anos. Esse crescimento vem aquecendo o mercado, trazendo novos fabricantes e permitindo que mais empresas ofereçam soluções nesse ramo de negócios. Atualmente, segundo levantamento do Portal Solar, já existem mais de 520 empresas formais no Brasil oferecendo serviços de instalação, manutenção ou planejamento de projetos fotovoltaicos, e esse número só tende a crescer.

Embora esse cenário de crescimento seja promissor, o Brasil ainda se encontra em um estágio de maturação para o seu mercado de energia solar. Quando comparado com países como Alemanha, Japão e Itália, ainda não possuímos um mercado plenamente sólido. Sendo assim, a necessidade de incentivos governamentais como linhas de financiamento especiais e subsídios prevalece. Dessa forma, o sistema de gestão do descarte deve afetar o mínimo possível o desenvolvimento do mercado, sem incutir taxas desnecessárias aos produtores e comerciantes das placas fotovoltaicas.

Por fim, ainda em termos de mercado, há a questão da longevidade da placa. Um equipamento instalado hoje terá problemas referentes à sua disposição/descarte daqui a, em média, 30 anos^[13]. Essa enorme distância entre causa e efeito permite o surgimento de muitas variáveis complicadoras, tais como: Caso a empresa que vendeu o painel vá a falência, quem arcará com os custos de logística reversa? Ao comprar uma casa com sistema de micro geração, o custo de descarte será do atual proprietário ou do antigo que usufruiu durante mais tempo dos benefícios? Seria justa o Estado arcar com esses custos? Assim, essa lacuna temporal também deve ser pensada no sistema proposto.

4) Considerações das premissas levantadas

Qualquer sistema proposto tanto por esse trabalho, quanto por outros que virão, deverá considerar as premissas levantadas para que o seu funcionamento seja adequado e perene na realidade brasileira. Em suma, os principais tópicos que devem ser abordados são:

- Dificuldades logísticas devido à enorme extensão territorial do país;
- Impossibilidade de um sistema centralizado;
- População ambientalmente pouco instruída;
- Legislação delimita os aspectos da logística reversa;
- Não onerar significativamente o mercado incipiente de painéis fotovoltaicos;
- Sistema que garanta o descarte dos painéis antigos, presentes e futuros;
- Caso seja adotado um fundo para a destinação final, deve haver meios eficazes de fiscalização para impedir atos ilícitos como corrupção e desvio de verbas.

5.2 DELIMITAÇÃO DAS PARTES ENVOLVIDAS (STAKEHOLDERS)

Por se tratar de uma questão ambiental, pode-se afirmar que o interesse numa política adequada abrange diferentes setores da sociedade, que possuem influência e envolvimento direto ou indireto na questão. Dessa forma, é necessário identificar todas as partes interessadas no processo para delimitar o seu envolvimento e responsabilidade, sempre respeitando as premissas levantadas na parte anterior. Segue uma lista geral de diferentes atores importantes à questão:

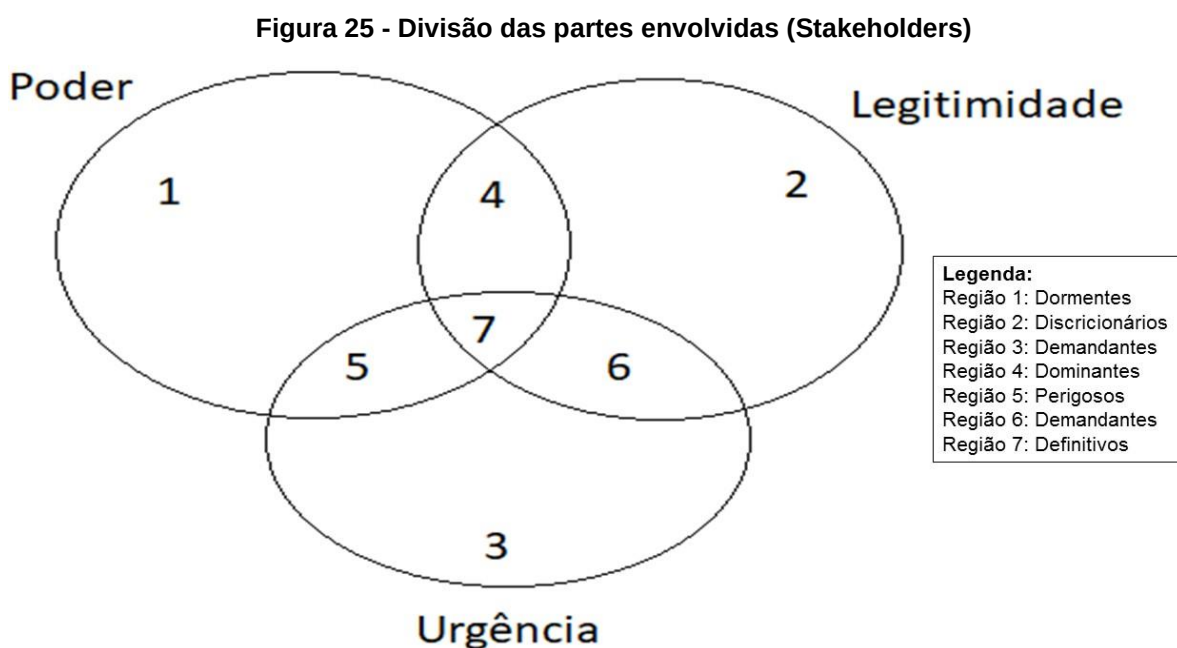
- Parte governamental: Ministério do Meio Ambiente, Ibama e agências estaduais de fiscalização ambiental, Ministérios de Minas e Energia, agências do setor de energia, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Ministério Público (caso aja alguma irregularidade), prefeituras e subprefeituras.
- Parte empresarial: Empresas produtoras e comercializadoras do setor de energia solar, empresas distribuidoras de energia, empresas que realizam manutenção nos equipamentos, empresas envolvidas na coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos, usinas de reciclagem, aterros sanitários.
- Sociedade civil: Organizações Não Governamentais (ONGs) de defesa do meio ambiente, Organizações da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIPs),

catadores de materiais recicláveis, indivíduos diretamente afetados, sindicatos, mídia, clientes e outros.

Nota-se que a lista é ampla e complexa, composta por diversos grupos com importância política e participativa diferentes. Portanto, para selecionar os principais atores, usou-se a metodologia proposta por Mitchell, Agle e Wood (1997)^[56] para classificar *stakeholders* segundo sua importância em um dado processo.

1) Selecionando as partes envolvidas

A metodologia referida consiste na alocação de cada parte envolvida em um grupo segundo o seu Poder, Legitimidade e Urgência. Visualmente tem-se o esquema representado pela Figura 25.



Fonte: Adaptado de Mitchell, Agle e Wood (1997)^[56]

Existem 7 regiões nesse diagrama, cada uma delas com uma característica distinta. Nas regiões 1, 2 e 3 encontram-se os *stakeholders* com menor importância, pois possuem apenas um atributo de classificação. Na região 1, por exemplo, estão as partes ditas dormentes, que embora possuam poder, não estão “ativos” ou com disposição para atuar com decisão na questão. Pode-se classificar o Ministério

Público nessa região, pois esse órgão só atua quando há irregularidades no processo ou alguma denúncia. Já na área 2, estão os atores ditos discricionários, que possuem legitimidade, mas pouca voz ativa nos processos de decisão. É o caso de instituições filantrópicas e associações diversas ligadas à causa ambiental. Na parte 3, estão os *stakeholders* com urgência, ditos demandantes, que desejam ações imediatas, mas não possuem legitimidade e poder para impô-las. Segundo os autores, os demandantes não são tão relevantes, porém possuem voz ativa^[56], como as ONGs. A medida que um *stakeholders* ganha outros atributos, sua importância cresce, assim como o seu poder de pressão. Nas regiões 4, 5 e 6 estão as partes classificadas como dominantes, perigosas e dependentes. Os dominantes são assim chamados por possuírem poder e legitimidade, como são os conselhos de administração, representantes de donos e acionistas, credores, sindicatos e líderes comunitários. Os dependentes são aqueles que possuem legitimidade e urgência, mas sem poder para reivindicações, tendo que recorrer a advogados ou ao ministério público para ter voz ativa. Já os perigosos são os *stakeholders* que podem oferecer risco físico às instalações, funcionários ou infraestrutura envolvida.

Por fim, a região 7 concentra as partes mais relevantes para a elaboração da política. Estão representados os atores com maior poder de decisão, urgência e legitimidade. Seus interesses devem ser amplamente debatidos e considerados para efetuar uma política adequada e eficiente. Os autores denominam esses *stakeholders* de definitivos.

Distribuindo as diversas partes relevantes para a elaboração de uma política adequada para o destino das placas fotovoltaicas tem-se:

- Os “definitivos” são os atores governamentais de atuação direta na questão ambiental, destacando-se o Ministério do Meio Ambiente que coordena recursos e possui a missão de gerenciar políticas nacionais para a integração do meio ambiente e produção econômica; o Ibama, que é o principal órgão federal de fiscalização ambiental; as agências ambientais estaduais. Esses atores possuem poder legal para atuar diretamente em assuntos do meio ambiente, além de terem a legitimidade proveniente da legislação, bem como a urgência, já que as suas funções são relacionadas com o tema.
- Na região 6 estão os produtores/comerciantes de placas fotovoltaicas, já que eles serão impactados diretamente pela política, possuindo urgência e

legitimidade para discutir o tema, mas sem o poder para atuar diretamente na questão, necessitando de representação legal (advogados) ou mobilização organizada (associações de interesse de classe). Por esses motivos, as usinas de reciclagem e empresas de aterros sanitário também pertencem ao grupo dos demandantes. Além desses, as ONGs e OSCIPs podem ser classificadas como demandantes, já que podem atuar através de pressão popular, mas não possuem poder de decisão direta.

As demais partes relacionadas, como consumidor direto, catadores de materiais recicláveis, prefeituras e etc. foram consideradas como *stakeholders* pouco impactantes enquanto influenciadores no processo de elaboração de uma política ambiental, pois possuem apenas um dos critérios de urgência, poder ou legitimidade usados na classificação. Por exemplo, os consumidores diretos gozam de legitimidade para questionar uma política que talvez altere os preços dos produtos comprados, mas não tem poder direto na tomada de decisão. Já as prefeituras, embora sejam entes legalmente estabelecidos, não possuem papel regulatório fundamental segundo a constituição federal, cabendo ao poder municipal apenas legislar complementarmente à união e aos estados.

Ressalta-se que a ANEEL, embora tenha grande impacto no desenvolvimento da energia solar, conforme demonstrado com a regulamentação 482^[18], não tem legitimidade e nem urgência para arbitrar sobre questões referentes ao descarte adequado das placas, cabendo-lhe apenas uma relevância periférica, podendo ser útil por questões técnicas à política, como será explicitado adiante.

5.3 POLÍTICA DE GESTÃO DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A política deverá, portanto, contemplar todo o Brasil, com todas as suas peculiaridades citadas, como tamanho continental e diferenças socioeconômicas, bem como ser aderente às leis ambientais vigentes. Assim, haverá uma política viável e efetiva, e não apenas uma cópia das decisões tomadas por outros países que tem realidades completamente alheia à local.

Primeiramente, propõem-se uma divisão entre os consumidores. Consumidores micro geradores, de uso residencial ou comercial de pequeno porte, deverão possuir um fluxo distinto de grandes geradores, cuja produção energética é muito maior, de tal forma que os resíduos gerados serão proporcionalmente maiores.

- **Fluxo para pequenos geradores:**

- 1) **Papel da ANEEL:**

Como afirmado anteriormente, essa agência possui uma importante qualidade técnica que será fundamental para implementação da política. Ela é a única que sabe exatamente quais e quantos consumidores possuem painéis instalados nas residências e comércios, pois para integrar esses painéis à rede elétrica deve-se solicitar autorização da ANEEL. Dessa forma, como a legislação estabelece a responsabilidade compartilhada, é imprescindível saber exatamente quem são os proprietários dos painéis, para gerenciar os descartes adequadamente. Assim, a ANEEL será responsável por registrar essas informações de proprietários e número de painel em um banco de dados, de tal forma que as ações estratégicas serão baseadas nas análises dessas informações.

- 2) **Papel dos produtores em um sentido amplo (distribuidores, importadores, etc):**

A legislação determina que os produtores de resíduos eletrônicos forneçam uma infraestrutura para o descarte adequado dos resíduos, dessa forma, eles terão que constituir uma estrutura para essa tarefa. Suas ações serão de duas formas: a primeira consistirá na manutenção de contêineres de coleta seletiva em pontos estratégicos designados pelo poder municipal, pode-se usar a localização dos Ecopontos já existentes facilitando tanto para os produtores quanto para os consumidores. No entanto, muitos municípios não possuem esse tipo de facilidade, logo, será necessário a criação de novos pontos de coleta. Além da estrutura de logística reversa, deverá ser formada uma estrutura de reciclagem e descarte final dos resíduos. Para essas tarefas, será necessário analisar as regiões com maior uso da energia solar, e assim, as informações reunidas pela ANEEL serão fundamentais.

Em termos econômicos, a manutenção dessa infraestrutura será de responsabilidade do poder privado. Para isso, propõe-se um acordo setorial, medida prevista no Artigo 3º da Lei 12.305/2010^[27], em que todos os produtores em um esforço conjunto deverão se comprometer perante o poder público na criação de um fundo setorial para a gestão dos resíduos sólidos de energia solar. Com o acordo setorial, os produtores ganharão poder de barganha para solicitar novos benefícios e incentivos fiscais para o desenvolvimento do setor. Além disso, o fundo garantirá uma maior perenidade para a infraestrutura, pois deve-se considerar que o descarte de um painel comprado agora, será descartado daqui 30 anos em média^[13].

O fundo será constituído conforme a participação que uma dada empresa possui no mercado, assim, empresas que tem uma maior parcela do mercado terão uma contribuição maior. Em termos efetivo, deverá ser calculado sobre cada painel vendido uma parcela que será destinada ao fundo, assegurando o descarte adequado dos painéis já no mercado, dos atuais e dos futuros. Logo, considera-se o custo para cada produtor de acordo com a eq. (1).

$$\text{Custo Fundo} = \text{Painéis Vendidos (ton)} \times \text{Custo para Descarte (R\$/ton)} \quad (1)$$

Ressalta-se que a criação do fundo é a melhor forma para garantir de um modo seguro a sustentabilidade do descarte adequado, além de ser uma medida que se adere à constituição vigente por meio do acordo setorial.

3) Papel do poder público:

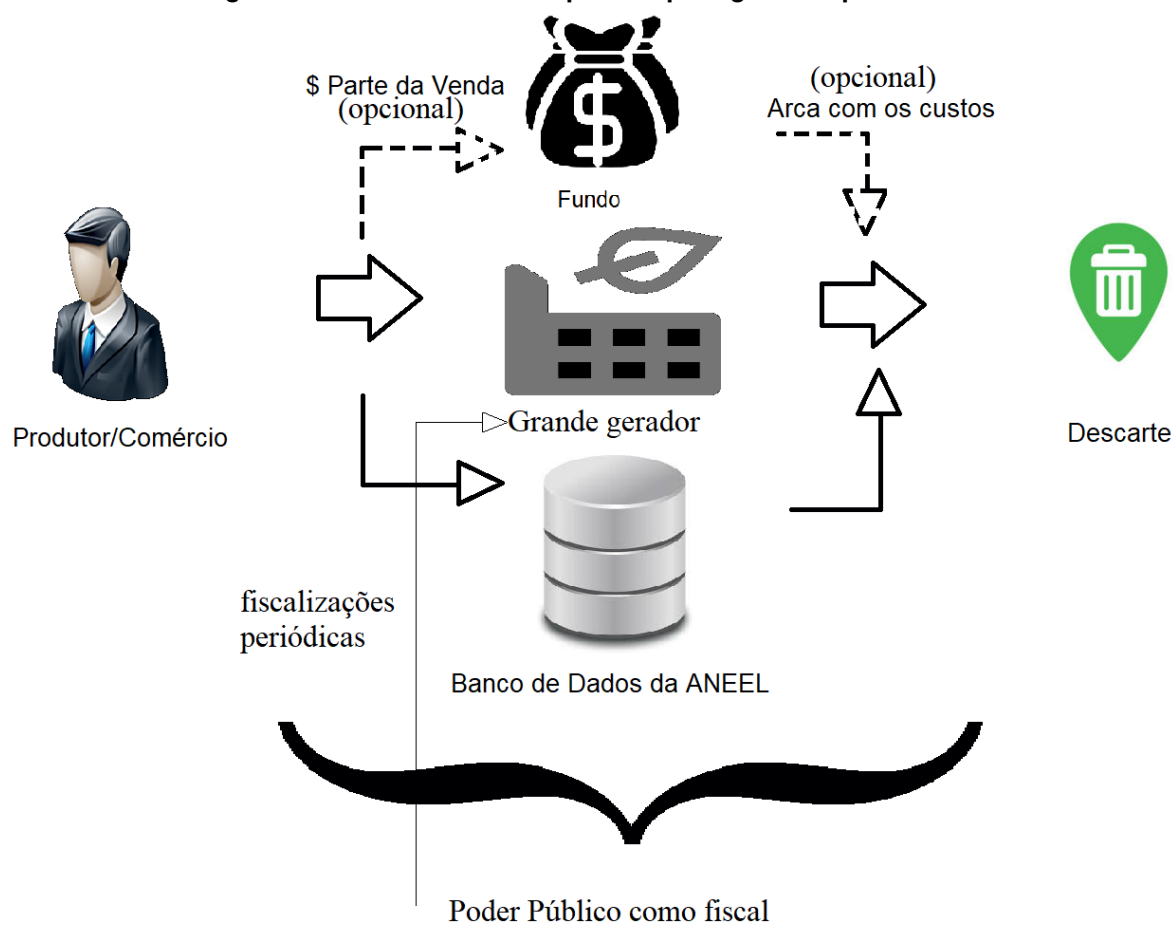
Caberá ao poder público, Ibama e demais instituições a fiscalização das ações tomadas pelas empresas, verificar se as cláusulas do acordo setorial estão sendo cumpridas adequadamente e por todas as empresas envolvidas. Tendo o banco de dados gerado pela ANEEL como fonte principal de informações, o poder público deverá procurar divergências entre a massa informada de painéis vendidos por parte da empresa e o quanto que de fato foi registrado pelo banco de dados, havendo divergências, ações investigativas deverão ser executadas, uma vez que haja, provavelmente, uma determinada empresa não que esteja contribuindo corretamente com o fundo, deixando de se responsabilizar pelo descarte adequado.

- **Fluxo para grandes geradores:**

Os grandes geradores concentram uma quantidade de placas fotovoltaicas considerada. Esse montante, ao ser descartado incorretamente, pode gerar um impacto ambiental significativo, por isso, é necessária uma fiscalização mais rigorosa. Por outro lado, a partir de uma perspectiva econômica, taxar demasiadamente esses geradores pode promover um entrave para a indústria brasileira de placas fotovoltaicas. Assim, sugere-se a seguinte política de gestão.

Os vendedores das placas e os compradores deverão realizar um contrato no momento da compra especificando como ocorrerá o descarte, explicitando se o responsável pela destinação final será o fabricante ou o comprador. Desse modo, não será obrigatória a inclusão no preço final das placas a parcela para alimentar o fundo, havendo maior eficiência econômica na transação.

Para assegurar a fiscalização adequada, o poder público deverá realizar pontos de controle, visitando as instalações do grande produtor em tempos predefinidos. Essas visitas são importantes uma vez que, ao contrário do que ocorre com o pequeno gerador, os eventuais descartes por defeitos antes do fim de vida útil são muito maiores e, conseqüentemente, ambientalmente mais impactantes^[13]. A Figura 27 mostra o fluxo da política para grandes produtores.

Figura 27 - Resumo fluxo da política para grandes produtores

Fonte: Elaboração própria

6. CONCLUSÃO

As significativas mudanças na matriz energética brasileira registram um aumento expressivo da energia solar. Os principais fatores que contribuem para esse rápido aumento são a evolução da Geração Distribuída como opção viável para produção energética tanto em residências como para uso comercial; a diminuição do preço da tecnologia de geração fotovoltaica e a limitação do potencial hidráulico aproveitável em grande parte das regiões brasileiras.

Embora a evolução do uso de placas fotovoltaicas seja essencial para o desenvolvimento sustentável do país, surge um novo desafio quanto à sua destinação final. A necessidade de um planejamento para a gestão desse novo resíduo, criação e implementação de novas políticas são cruciais para minimizar futuros problemas econômicos, social e ambientais decorrentes ao seu descarte impróprio.

Pelos cálculos realizados, os números apontam para um total de, aproximadamente, 550.000 toneladas de resíduos provenientes de, aproximadamente, 32 milhões de placas fotovoltaicas que serão descartadas até 2050. Isto coloca o Brasil como maior país gerador de resíduos desse tipo da América Latina.

As placas fotovoltaicas pós consumo foram classificadas como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Esta medida facilitará todas as exigências dadas pela PNRS referentes à logística reversa, partes envolvidas na destinação final e respectivas responsabilidades.

Foram criados três cenários distintos quanto à destinação final das placas fotovoltaicas. Dentre os cenários analisados, recomenda-se a adoção do Cenário C. Esta é a opção que causaria o menor impacto ambiental, dado que a quantidade de resíduos enviada para o descarte nos aterros sanitários é a menor entre as alternativas propostas e a contaminação do solo e do ar por metais pesados é minimizada com o processo de reciclagem, diferentemente do que aconteceria se as placas fotovoltaicas fossem dispostas sem qualquer tipo de tratamento. Esse cenário também apresenta o maior potencial de geração de lucro bruto quando se considera o custo de aterro dos rejeitos, o custo estimado da reciclagem e a receita gerada pela venda dos materiais recuperados na reciclagem. Além disso, neste cenário há a

recuperação de metais que podem ter o valor de mercado aumentado devido à quantidade limitada destes recursos na natureza, mas este fator não foi considerado nos cálculos devido à impossibilidade de prever estes preços.

O custo adotado para o Cenário C foi de R\$546/ton. A eficiência de recuperação dos materiais das placas adotada é satisfatória para a maioria dos materiais. Entretanto, ainda é pouco eficiente em relação a extração da prata. Existem procesos experimentais que conseguem retirar uma maior quantidade desse material, porém optou-se por utilizar um procedimento já existente e utilizado em escala industrial. A massa calculada para disposição final, ao adotar o Cenário C, foi de 80,6 milhões de toneladas. Sendo 85% a mais que o Cenário A e 44% que o Cenário B. O custo total para aterrar em aterro Classe I foi de R\$32,2 milhões.

Por fim, para a gestão adequada do descarte, recomenda-se a divisão em dois fluxos distintos, um para pequenos geradores e outro para grandes. No primeiro fluxo, a destinação de parte do valor de vendas das placas para o fundo de descarte irá garantir recursos financeiros para a destinação adequada dos painéis no fim de vida, sem onerar demasiadamente o mercado consumidor e os produtores. Já no segundo, os grandes produtores têm a opção de escolher um serviço terceiro para descartar suas placas, ou contribuir com o fundo, assim, ganha-se eficiência no comércio.

7. SUGESTÃO PARATRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada para este Trabalho de Formatura cria mais dúvidas relacionadas ao tema. Tanto as questões dos métodos de tratamento quanto às políticas de gestão no Brasil devem ser ainda muito estudadas e discutidas para que o país esteja preparado para o problema de destinação das placas fotovoltaicas. Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Viabilidade tecnológica e econômica de uma linha de desmontagem, tratamento, recuperação e reciclagem em escala industrial dos materiais de maior interesse: prata, cobre, silício, alumínio e vidro.
- Execução de processos de recuperação de placas fotovoltaicas de outras tecnologias
- Políticas de descarte mais detalhadas em escalas municipais, estaduais e federais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Editora Brasil Energia (2016). Cenários solar 2016-2017.
2. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2017). Best Research-Cell Efficiencies. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>. Acesso em: 16 abr. 2017.
3. Ordoñez, R. Energia Solar Cresceu 70% em Dois Anos. (2017). Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/energia-solar-cresceu-70-em-dois-anos-20715504>>. Acesso em: 23 dez. 2017.
4. CARR, G. (2012). Sunny Uplands: Alternative Energy Will No Longer be Alternative. Disponível em: <<https://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands>>. Acesso em: 28 mai. 2017.
5. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2012). Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2017.
6. Pereira, E. B. et al. (2006). Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2017.
7. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2012). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20120914_1.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2017.
8. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2016). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.
9. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2017). Área Territorial Brasileira. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm>. Acesso em: 19 jun. 2017.
10. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE). (2016). Photovoltaics Report. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2017.
11. Boletim de Monitoramento do Sistema Energético. (2017). Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico>>. Acesso em: 14 jun. 2017.
12. Boletins Mensal de Monitoramento do Sistema Energético (2009 a 2017). Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

13. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Disponível em: <
http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.
14. Decreto Federal nº 5.163/2004. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM
Acesso em: 10 jun. 2017
15. Organización Latinoamericana De Energía (OLADE). Curso de la Generación Distribuida. SABA System., 2011. Disponível em:
<<http://www.olade.org/elearning>>. Acesso em 12 jun. 2017.
16. Barbosa Filho, W. P., & de Azevedo, A. C. S. (2013). Geração distribuída: vantagens e desvantagens. In II Simposio de estudos e pesquisas em ciencias ambientais na Amazonia. Disponível em: <
http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf>. Acesso em: 20 de mai. de 2017
17. Instituto Nacional de Eficiência Energética. Notas sobre geração Distribuída (INEE). Disponível em:
<<http://www.inee.org.br/downloads/forum/Notas%20sobre%20GD.pdf>>. Acesso em: 15 jun 2017.
18. ANEEL, Resolução Normativa Nº 482/2012. Disponível em: <
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 20 jun 2017.
19. ANEEL, Resolução Normativa Nº 687/2015. Disponível em: <
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em: 20 jun 2017.
20. IEA (2011), World Energy Outlook. Disponível em <
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf> Acesso em: 16 jun 2017
21. Parlamento Europeu. Diretiva WEEE 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 2012 jul. 04: relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Jornal Oficial da União Europeia, 2012 jul. 27.
22. Estado Da California Dos Estados Unidos Da América. SB 489 do Comitê de Segurança Ambiental e Materiais Tóxicos, de 2015 jun. 30: Hazadours waste: photovoltaic modules
23. Parlamento Europeu. Diretiva WEEE 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 2003 jan. 27: relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos. Jornal Oficial da União Europeia, 2003 fev.13.
24. PV cycle (2015), Solarwaste in the European Union, PV cycle. Disponível em: www.solarwaste.eu/in-your-country. Acesso 16 mai. 2017.
25. European Commission (2014), Frequently Asked Questions on Directive 2012/19/EU, April 2014, European Commission, Brussels. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/faq.pdf>. Acesso em 15 mai. 2017.
26. European Parliament and Council (2008b), Regulation (EC) No. 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures, Amending and Repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and Amending Regulation (EC) No. 1907/2006, EU, Brussels. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex:32008R1272>. Acesso em 16 mai. 2017.

27. Brasil. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos [recurso eletrônico]. – 2. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 73 p. – (Série legislação; n. 81).
28. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10.004: Resíduos Sólidos: Classificação.
29. EMPA. E-Waste Composition - Material Composition. Disponível em http://ewasteguide.info/material_composition. Acesso em 19 mai. 2017.
30. Associação brasileira de normas técnicas. NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.
31. Brasília: MMA; IBAMA, 2012. Lista brasileira de resíduos sólidos. Disponível em: www.ibama.gov.br/phocadownload/emissoeseresiduos/residuos/ibama-lista-brasileira-de-residuos-solidos.xls+&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br. Acesso em 5 jul. 2017
32. Brasil, Resolução minuta resolução CONAMA. Proposta de resolução sobre REE. Disponível em http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/MinutaREEE_Recladores.pdf. Acesso em 5 jul. 2017.
33. European Commission (2000), Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 Replacing Decision 94/3/EC Establishing a List of Wastes Pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on Waste and Council Decision 94/904/EC Establishing a List of Hazardous Waste Pursuant to Article1(4) of Council Directive 91/689/EEC on Hazardous Waste, European Commission, Brussels. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32000D0532>. Acesso em 20 mai. 2017.
34. Adziemska, Ewa, Ostrowski, Piotrcenian, Adam et al. Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicon solar cells and modules. Ecological Chemistry and Engineering S, v. Vol. 17, No. 3, 2010. Disponível em: [http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/RadziemskaOstrowski_17\(S3\).pdf](http://tchie.uni.opole.pl/freeECE/S_17_3/RadziemskaOstrowski_17(S3).pdf)>. Acesso em: 21 dez. 2017.
35. Kang, Sukmin, Yoo, Sungyeolee, Jina et al. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. Renewable Energy, v. 47, p. 152-159, 2012.
36. Ribeiro Dias, P.. Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares). Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
37. BIO Intelligence Service. Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive. Final report. Paris, França, 2011. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>>. Acesso em: 21 dez 2017.
38. PV Cycle Association | WEEE compliance & waste management scheme. Pvcycle.org. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.
39. Larsen, K.. End-of-life PV: then what?. Renewable Energy Focus, v. 10, n. 4, p. 48-53, 2009.
40. Paino, A.. Photovoltaic waste assessment in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 41, p. 99-112, 2015.

41. D'adamo, I. et. al. (2017). Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. Disponível em: <<http://downloads.hindawi.com/journals/ijp/2017/4184676.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2017.
42. Argus. (2016). Argus Metal Prices Northe America Market Prices, News and Analysis. Disponível em: <<https://www.argusmedia.com/~media/files/pdfs/samples/argus-metal-prices.pdf?la=en>>. Acesso em 11 dez. 2017.
43. London Metal Exchange. Disponível em: <<https://www.lme.com/>>. Acesso em 11 dez. 2017.
44. Banco Central do Brasil (2017). Taxas de câmbio. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br#!/n/txcambio>>. Acesso em: 11 dez. 2017.
45. UOL Economia. (2018). Painéis solares iluminam a Amazônia, última fronteira do Brasil sem energia. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/afp/2017/10/11/paineis-solares-iluminam-a-amazonia-ultima-fronteira-do-brasil-sem-energia.htm>>. Acessado em: 7 dez 2017.
46. Luongo, A. C.. Entrevista sobre Disposição Final e Logística Reversa de REEE da Essencis Caieiras, SP.
47. Stiftung Ear: Startseite. Disponível em: <<https://www.stiftung-ear.de>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
48. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2016). Demanda de Energia 2050. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2017.
49. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2016). O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>>. Acesso em 22 jun. 2017.
50. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2017). Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9>. Acesso em: 25 jun. 2017.
51. Munsell, M. (2014). Could First Solar's Thin Film Beat Silicon PV on Efficiency. Disponível em <<https://www.greentechmedia.com/articles/read/could-first-solars-thin-film-beat-silicon-pv-on-efficiency>>. Acesso em: 14 mai. 2017.
52. European Commission DG ENV (2011). Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bi o%20final.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
53. Senado.gov.br. (2018). CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Disponível em: <https://www.senado.gov.br/atividade/const/con1988/CON1988_05.10.1988/art_225_.asp> Acesso: 6 Dez. 2017.
54. Abралatas.org.br (2017). A reciclagem no Brasil em números | Abралatas. [online]. Disponível em: <<http://www.abралatas.org.br/a-reciclagem-do-brasil-em-numeros/>>. Acesso em 30 nov. 2017

55. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 20.395/2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 11 maio 2017.
56. Mitchell, Ronald K.; Alge, Bradley R.; Wood, Donna J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. *The Academy of Management Review*, Vol. 22, No. 4. Oct., 1997, pp. 853-886
57. Cabral Souza, I., & torres Cazielgrandi, A., & SENNA Rochas, P. (2013). Energia solar – Análise comparativa entre Brasil e Alemanha. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/X-009.pdf> Acesso em: 24 de mai. de 2017

ANEXO I

Tabela 26 - Participação de cada tecnologia no total de energia produzida

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio	Outros
2009	35,0%	48,0%	13,0%	4,0%
2010	37,0%	50,0%	8,0%	5,0%
2011	25,0%	62,0%	6,0%	7,0%
2012	25,0%	64,0%	5,0%	6,0%
2013	25,0%	66,0%	4,0%	5,0%
2014	25,0%	68,0%	4,5%	2,5%
2015	25,0%	68,0%	5,0%	2,0%
2016	23,9%	65,1%	5,0%	5,9%
2017	22,9%	62,2%	5,0%	9,9%
2018	21,8%	59,4%	5,0%	13,8%
2019	20,8%	56,5%	5,0%	17,8%
2020	19,7%	53,6%	5,2%	21,5%
2021	18,9%	51,5%	5,0%	24,6%
2022	18,2%	49,4%	5,0%	27,4%
2023	17,4%	47,3%	5,0%	30,3%
2024	16,6%	45,3%	5,0%	33,1%
2025	15,9%	43,2%	5,0%	36,0%
2026	15,1%	41,1%	5,0%	38,8%
2027	14,3%	39,0%	5,0%	41,7%
2028	13,6%	36,9%	5,0%	44,5%
2029	12,8%	34,8%	5,0%	47,4%
2030	12,0%	32,8%	4,7%	50,5%
2031	11,6%	31,4%	5,0%	52,0%
2032	11,1%	30,2%	5,0%	53,7%
2033	10,7%	29,0%	5,0%	55,4%
2034	10,2%	27,8%	5,0%	56,9%
2035	9,8%	26,7%	5,0%	58,5%
2036	9,4%	25,6%	5,0%	59,9%
2037	9,0%	24,6%	5,0%	61,3%
2038	8,7%	23,6%	5,0%	62,7%
2039	8,3%	22,7%	5,0%	64,0%
2040	8,0%	21,8%	5,0%	65,2%
2041	7,7%	20,9%	5,0%	66,4%
2042	7,4%	20,1%	5,0%	67,6%
2043	7,1%	19,3%	5,0%	68,6%
2044	6,8%	18,5%	5,0%	69,7%
2045	6,5%	17,8%	5,0%	70,7%
2046	6,3%	17,0%	5,0%	71,7%
2047	6,0%	16,4%	5,0%	72,6%
2048	5,8%	15,7%	5,0%	73,5%
2049	5,5%	15,1%	5,0%	74,4%
2050	5,3%	14,5%	5,0%	75,2%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 27 - Projeção da geração de energia solar distribuída e centralizada

Ano	Energia Solar Distribuída (GWh)	Energia Solar Centralizada (GWh)
2009	-	-
2010	-	-
2011	-	-
2012	-	-
2013	1	0
2014	3	1
2015	13	4
2016	22	7
2017	351	1.451
2018	681	2.895
2019	1.011	4.338
2020	1.340	5.782
2021	2.824	7.225
2022	4.308	8.669
2023	5.792	10.113
2024	7.276	11.556
2025	8.760	13.000
2026	12.266	15.600
2027	15.772	18.200
2028	19.277	20.800
2029	22.783	23.400
2030	26.289	26.000
2031	34.620	41.543
2032	42.950	51.540
2033	51.281	61.537
2034	59.612	71.534
2035	67.943	81.531
2036	76.273	91.528
2037	84.604	101.525
2038	92.935	111.522
2039	101.266	121.519
2040	109.596	131.516
2041	114.430	137.316
2042	119.264	143.117
2043	124.098	148.917
2044	128.931	154.718
2045	133.765	160.518
2046	138.599	166.319
2047	143.433	172.119
2048	148.267	177.920
2049	153.100	183.720
2050	157.934	189.521

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 - Evolução da eficiência média das placas fotovoltaicas

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2006	18,1%	12,0%	9,0%
2007	18,4%	12,5%	9,7%
2008	18,7%	13,0%	10,4%
2009	19,0%	13,5%	11,1%
2010	19,3%	14,0%	11,8%
2011	19,6%	14,5%	12,5%
2012	19,9%	15,0%	13,2%
2013	20,1%	15,5%	13,9%
2014	20,4%	16,0%	14,6%
2015	20,7%	16,5%	15,3%
2016	21,0%	17,0%	16,0%
2017	21,1%	17,1%	16,1%
2018	21,3%	17,2%	16,3%
2019	21,4%	17,3%	16,4%
2020	21,5%	17,4%	16,6%
2021	21,7%	17,6%	16,7%
2022	21,8%	17,7%	16,9%
2023	21,9%	17,8%	17,0%
2024	22,1%	17,9%	17,2%
2025	22,2%	18,0%	17,3%
2026	22,4%	18,1%	17,5%
2027	22,5%	18,2%	17,6%
2028	22,6%	18,3%	17,8%
2029	22,8%	18,5%	17,9%
2030	22,9%	18,6%	18,1%
2031	23,0%	18,7%	18,2%
2032	23,2%	18,8%	18,4%
2033	23,3%	18,9%	18,5%
2034	23,4%	19,0%	18,6%
2035	23,6%	19,1%	18,8%
2036	23,7%	19,2%	18,9%
2037	23,8%	19,3%	19,1%
2038	24,0%	19,5%	19,2%
2039	24,1%	19,6%	19,4%
2040	24,2%	19,7%	19,5%
2041	24,4%	19,8%	19,7%
2042	24,5%	19,9%	19,8%
2043	24,7%	20,0%	20,0%
2044	24,8%	20,1%	20,1%
2045	24,9%	20,2%	20,3%
2046	25,1%	20,4%	20,4%
2047	25,2%	20,5%	20,6%
2048	25,3%	20,6%	20,7%
2049	25,5%	20,7%	20,9%
2050	25,6%	20,8%	21,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 29 - Número de placas fotovoltaicas em operação para geração distribuída por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	629	2.158	379
2014	1.860	6.461	1.218
2015	7.951	27.149	5.597
2016	12.709	42.704	9.058
2017	192.563	646.926	143.200
2018	354.045	1.189.282	275.324
2019	496.938	1.669.064	405.085
2020	621.258	2.086.355	532.260
2021	1.250.355	4.198.514	1.111.716
2022	1.818.823	6.106.596	1.681.078
2023	2.327.782	7.814.449	2.240.606
2024	2.778.326	9.325.824	2.790.553
2025	3.171.523	10.644.382	3.331.164
2026	4.200.856	14.097.417	4.625.033
2027	5.096.759	17.101.953	5.897.303
2028	5.861.627	19.666.191	7.148.508
2029	6.497.796	21.798.129	8.379.168
2030	7.007.549	23.505.575	9.589.785
2031	8.807.028	29.538.356	12.526.725
2032	10.428.014	34.971.264	15.416.598
2033	11.883.231	39.847.178	18.260.528
2034	13.184.592	44.206.241	21.059.600
2035	14.343.251	48.086.025	23.814.869
2036	15.369.646	51.521.687	26.527.354
2037	16.273.546	54.546.117	29.198.044
2038	17.064.089	57.190.079	31.827.898
2039	17.749.822	59.482.336	34.417.845
2040	18.338.734	61.449.775	36.968.787
2041	18.279.667	61.245.848	38.310.817
2042	18.188.838	60.935.617	39.632.936
2043	18.069.280	60.529.274	40.935.583
2044	17.923.813	60.036.289	42.219.185
2045	17.755.056	59.465.454	43.484.158
2046	17.565.439	58.824.928	44.730.904
2047	17.357.215	58.122.273	45.959.813
2048	17.132.474	57.364.500	47.171.266
2049	16.893.151	56.558.098	48.365.633
2050	16.641.037	55.709.072	49.543.271

Fonte: Elaboração própria

Tabela 30 - Número de placas fotovoltaicas em operação para geração centralizada por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	195	669	118
2014	574	1.992	376
2015	2.676	9.137	1.884
2016	4.188	14.073	2.985
2017	795.975	2.674.126	591.928
2018	1.504.836	5.054.934	1.170.240
2019	2.132.344	7.161.898	1.738.207
2020	2.680.032	9.000.281	2.296.104
2021	3.198.887	10.741.402	2.844.196
2022	3.659.915	12.287.958	3.382.739
2023	4.064.185	13.643.615	3.911.980
2024	4.412.740	14.811.952	4.432.160
2025	4.706.598	15.796.457	4.943.508
2026	5.342.791	17.929.574	5.882.275
2027	5.881.558	19.735.312	6.805.370
2028	6.324.647	21.219.657	7.713.181
2029	6.673.765	22.388.449	8.606.087
2030	6.930.577	23.247.386	9.484.449
2031	10.568.434	35.446.027	15.032.070
2032	12.513.617	41.965.517	18.499.918
2033	14.259.878	47.816.614	21.912.633
2034	15.821.511	53.047.490	25.271.520
2035	17.211.901	57.703.230	28.577.843
2036	18.443.576	61.826.024	31.832.824
2037	19.528.256	65.455.341	35.037.653
2038	20.476.907	68.628.095	38.193.477
2039	21.299.786	71.378.803	41.301.414
2040	22.006.480	73.739.730	44.362.544
2041	21.935.601	73.495.018	45.972.980
2042	21.826.605	73.122.740	47.559.523
2043	21.683.136	72.635.128	49.122.699
2044	21.508.576	72.043.547	50.663.023
2045	21.306.067	71.358.545	52.180.990
2046	21.078.526	70.589.913	53.677.084
2047	20.828.658	69.746.728	55.151.776
2048	20.558.969	68.837.400	56.605.519
2049	20.271.782	67.869.718	58.038.759
2050	19.969.245	66.850.887	59.451.925

Fonte: Elaboração própria

Tabela 31 - Número de placas fotovoltaicas para geração distribuída compradas por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	632	2.169	381
2014	1.238	4.325	843
2015	6.124	20.803	4.403
2016	4.789	15.655	3.482
2017	180.788	607.363	134.838
2018	162.318	545.159	132.806
2019	144.515	485.230	131.087
2020	125.756	422.113	128.477
2021	632.981	2.125.199	583.024
2022	571.953	1.919.781	572.865
2023	514.694	1.727.105	565.263
2024	455.693	1.528.656	555.592
2025	397.868	1.334.235	546.241
2026	1.036.879	3.478.343	1.303.219
2027	906.010	3.038.453	1.284.091
2028	777.168	2.605.504	1.266.680
2029	646.836	2.167.721	1.245.920
2030	518.960	1.738.329	1.225.779
2031	1.824.607	6.117.065	2.969.728
2032	1.650.397	5.531.591	2.927.375
2033	1.488.439	4.987.350	2.889.687
2034	1.331.047	4.458.608	2.844.130
2035	1.184.911	3.967.786	2.799.627
2036	1.084.265	3.629.794	2.789.721
2037	955.365	3.197.028	2.746.705
2038	836.068	2.796.591	2.704.962
2039	725.119	2.424.261	2.663.838
2040	622.346	2.079.445	2.623.651
2041	22.230	68.645	1.473.617
2042			1.451.792
2043			1.425.377
2044			1.404.816
2045			1.387.575
2046			1.437.857
2047			1.539.451
2048			1.517.926
2049			1.497.019
2050			1.475.088
Total	18.809.997	63.024.307	52.254.932

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32 - Número de placas fotovoltaicas para geração centralizada compradas por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	196	672	118
2014	381	1.330	259
2015	2.114	7.184	1.516
2016	1.522	4.968	1.108
2017	795.776	2.673.456	591.910
2018	712.431	2.392.797	581.224
2019	634.640	2.130.919	573.781
2020	554.002	1.859.585	563.606
2021	524.636	1.760.525	553.715
2022	466.115	1.563.625	544.067
2023	408.928	1.371.286	534.672
2024	352.645	1.182.053	525.519
2025	297.422	996.452	516.621
2026	641.183	2.149.845	946.134
2027	558.877	1.873.264	942.155
2028	462.778	1.550.436	928.734
2029	366.374	1.226.703	913.589
2030	271.581	908.485	898.753
2031	3.668.523	12.301.484	5.591.185
2032	1.997.470	6.695.004	3.524.326
2033	1.810.054	6.065.145	3.491.763
2034	1.611.907	5.399.514	3.426.849
2035	1.434.536	4.803.774	3.373.272
2036	1.279.732	4.283.927	3.329.544
2037	1.127.126	3.771.583	3.278.405
2038	985.430	3.295.977	3.228.292
2039	854.083	2.855.205	3.179.239
2040	732.502	2.447.299	3.131.294
2041	32.052	100.357	1.784.094
2042			1.718.344
2043			1.687.047
2044			1.661.977
2045			1.638.856
2046			1.803.191
2047			2.247.314
2048			2.214.840
2049			2.185.953
2050			2.153.052
Total	22.585.014	75.672.855	64.266.320

Fonte: Elaboração própria

Tabela 33 - Número de placas fotovoltaicas para geração distribuída descartadas por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	3	11	2
2014	6	22	4
2015	34	115	24
2016	30	100	22
2017	935	3.141	696
2018	836	2.804	681
2019	1.627	5.463	1.330
2020	1.440	4.836	1.306
2021	3.887	13.052	3.571
2022	3.489	11.709	3.507
2023	5.751	19.305	5.749
2024	5.163	17.329	5.659
2025	4.685	15.723	5.646
2026	7.559	25.348	9.364
2027	10.135	34.011	11.848
2028	12.342	41.409	15.521
2029	10.704	35.908	15.306
2030	9.241	30.994	15.208
2031	25.208	84.554	32.878
2032	29.517	99.040	37.617
2033	33.352	111.871	45.915
2034	29.802	99.933	45.213
2035	26.354	88.345	44.510
2036	58.133	195.017	77.555
2037	51.700	173.384	76.328
2038	45.733	153.326	75.418
2039	39.567	132.607	74.195
2040	33.586	112.516	73.008
2041	81.704	273.940	132.211
2042	72.360	242.567	130.288
2043	61.554	206.327	123.310
2044	53.645	179.903	121.787
2045	50.152	168.235	123.183
2046	99.123	331.837	192.035
2047	253.256	850.051	312.063
2048	227.214	762.424	307.975
2049	202.143	678.093	304.136
2050	176.797	592.866	298.907
Total	1.728.768	5.798.117	2.723.975

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34 - Número de placas fotovoltaicas para geração centralizada descartadas por ano

Ano	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino de telureto de cádmio
2013	1	3	1
2014	2	7	1
2015	12	39	8
2016	10	31	7
2017	3.989	13.403	2.967
2018	3.570	11.989	2.912
2019	7.152	24.022	5.828
2020	6.332	21.262	5.724
2021	5.796	19.457	5.637
2022	5.101	17.116	5.538
2023	4.672	15.673	5.444
2024	4.101	13.755	5.353
2025	3.574	11.982	5.287
2026	5.000	16.759	7.380
2027	20.197	67.818	19.132
2028	19.776	66.384	21.004
2029	17.334	58.171	20.765
2030	14.836	49.774	20.470
2031	30.728	103.050	43.642
2032	52.499	176.228	56.673
2033	64.069	214.971	79.357
2034	50.485	169.350	68.217
2035	44.331	148.657	67.202
2036	48.267	161.835	74.853
2037	42.630	142.887	73.864
2038	36.939	123.760	72.751
2039	31.339	104.950	71.581
2040	25.918	86.744	70.438
2041	103.448	346.801	174.486
2042	65.967	221.067	132.421
2043	55.055	184.447	124.450
2044	47.247	158.295	122.223
2045	41.520	139.096	121.455
2046	173.751	582.358	308.595
2047	842.513	2.829.546	776.448
2048	754.671	2.533.826	764.865
2049	671.773	2.254.840	756.441
2050	587.253	1.970.511	743.550
Total	3.891.860	13.060.866	4.836.972

Fonte: Elaboração própria