

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

VITOR VAZGAUSKA MAMBRINI

**RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO BRASIL:
ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS, REGULATÓRIOS E SOCIOAMBIENTAIS**

SÃO PAULO

2020

VITOR VAZGAUSKA MAMBRINI

**RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO BRASIL:
ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS, REGULATÓRIOS E SOCIOAMBIENTAIS**

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientadora: Prof^a Dr^a Virginia Parente

SÃO PAULO

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

[FOLHA DE APROVAÇÃO]

AGRADECIMENTOS

A meus pais que sempre me incentivaram aos estudos e fizeram o possível dentro de seu alcance para a minha formação.

À minha companheira Beatriz pelo amor, estímulo e paciência nestes dois anos de especialização.

A todos os professores que já tive na vida, cuja dedicação diária melhora pessoas e sociedades.

A todos os amigos que de alguma forma me acompanharam e ajudaram nesta etapa de minha vida, especialmente aos colegas deste curso.

E principalmente a Deus, pelas oportunidades que tenho na vida e por nos inspirar forças nos momentos mais difíceis.

RESUMO

MAMBRINI, Vitor Vazgauska. **Reciclagem de Painéis Solares Fotovoltaicos no Brasil: Aspectos Técnicos, Econômicos, Regulatórios e Socioambientais.** 2020.

58p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A partir de 2010 a geração de energia solar fotovoltaica experimentou grande crescimento no Brasil e no mundo. Possuindo um ciclo de vida que varia entre vinte e trinta anos, é previsto um enorme acúmulo de painéis nas próximas décadas, sendo a grande maioria destes da tecnologia de silício cristalino. Certos elementos na fabricação dos painéis representam riscos à saúde e ao meio ambiente quando não descartados adequadamente. Métodos de reciclagem para componentes comuns já existem, mas processos que extraiam alto valor agregado dos materiais recuperados e minimizem impactos ambientais são incipientes e demandam pesquisa. Aspectos de natureza logística e administrativa podem se tornar um obstáculo, principalmente em países com grandes dimensões, como é o caso do Brasil. Apesar de a regulamentação existente já apresentar normativas para a contenção e a mitigação de alguns riscos, ela ainda carece de um maior debate e aprofundamento. Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de analisar o estado atual do descarte de painéis FV no Brasil e oferecer proposições de políticas públicas para que o país se prepare para a gestão deste resíduo. Após a análise realizada, foi possível concluir que algumas políticas públicas poderão ser adotadas para lidar com esta questão. Dentre elas destacaram-se: (i) investimento em P&D para aprimorar as rotas de *reciclagem de alto valor* e aplicação em larga escala; (ii) exigência de que haja reciclagem, ainda que de *baixo valor*, enquanto rotas mais avançadas não amadurecem; e (iii) elaboração de esquemas logísticos partilhados entre os *stakeholders*, de forma a cobrir as regiões com maior número de painéis instalados.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; painel solar fotovoltaico; reciclagem; logística reversa; REEE.

ABSTRACT

MAMBRINI, Vitor Vazgauska. **Solar Photovoltaic Panels Recycling in Brazil: Technical, Economic, Regulatory and Socioenvironmental Aspects.** 2020. 58p. Specialization's Dissertation on Renewable Energy, Distributed Generation and Energy Efficiency – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

From the year 2010 the solar photovoltaic energy generation went through a large growth in Brazil and the world. Having a life cycle that varies between twenty and thirty years, a huge accumulation of panels is predicted to the next decades, being the great majority of the crystalline silicon technology. Certain elements used in their manufacture show risks to health and the environment when not properly disposed of. Recycling methods for ordinary components already exist, but processes that extract high value from recovered materials and minimize environmental impacts are incipient and demand research. Logistic and managerial aspects might become an obstacle, specially in countries with great extensions, such as Brazil. Although the current policy already presents regulation for containment and mitigation for some of the risks, it still needs more debating and deepening. In this context, this work has the objective of analyzing the current state of PV disposal in Brazil and offer public policies propositions so the country can be prepared for the management of this type of waste. After the analysis made, it was possible to conclude that some public policies could be adopted to handle this matter. Among these, the following stand out: (i) investment in R&D to improve upcycling and large-scale application; (ii) demand that there is recycling, even if it is low value, while upcycling has not yet matured; and (iii) elaboration of shared logistics schemes among stakeholders, in a way that regions with greater number of installed panels are covered.

Keywords: solar photovoltaic energy; solar photovoltaic panel; recycling; reverse logistics; WEEE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição de um módulo fotovoltaico de silício cristalino	17
Figura 2 - <i>Marketshare</i> absoluto (a) e relativo (b) das tecnologias fotovoltaicas 2000-2019	19
Figura 3 - Cadeia de processos para <i>reciclagem de baixo e alto valor</i> , respectivamente	23
Figura 4 - Processo do projeto FRELP.....	25
Figura 5 - Progresso da recuperação de material na reciclagem de módulos de silício	26
Figura 6 - Histórico de preços médios da prata (US\$/kg) de 1970 a 2020	34
Figura 7 - Estimativa do descarte anual de placas fotovoltaicas para geração distribuída e centralizada, respectivamente	35
Figura 8 - Maiores fabricantes de painel solar fotovoltaico no mundo.....	40
Figura 9 - Comparação de potência fotovoltaica total instalada no Brasil entre geração distribuída e centralizada	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Marketshare de tecnologias no mercado Brasileiro de 2017 a 2020.....	19
Tabela 2 - Composição de massa a cada 1000 kg de painéis de cinco modelos	20
Tabela 3 - Dados sobre empresas do mercado de reciclagem fotovoltaica	24
Tabela 4 - Índices de reciclagem do projeto FRELP por material	25
Tabela 5 - Dados de reciclagem da PV Cycle de 2017 a 2019	27
Tabela 6 - Comparação da energia gasta na produção primária e reciclada de módulos de c-Si	34
Tabela 7 - Custos medianos de diferentes métodos de reciclagem por tonelada de painéis	36
Tabela 8 - Estado geral de rodovias de acesso a regiões com grandes empreendimentos FV	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metas da diretiva de REEE da União Europeia.....	29
---	----

LISTA DE SIGLAS

a-Si - Silício amorfo

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

c-Si - Silício cristalino

CdTe - Telureto de cádmio

CIGS - Disseleneto de cobre, índio e gálio

CIS - Seleneto de cobre e índio

CPV - Concentrador fotovoltaico

DSSC - Dye-sensitized solar cell

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

EVA - Etileno acetato de vinila

FRELP - Full Recovery End of Life Photovoltaic

FV – Fotovoltaica(o)

GC – Geração centralizada

GD – Geração distribuída

GW – Gigawatt

GWp – Gigawatt-pico

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

IRENA - International Renewable Energy Agency

JPEA - Japan Photovoltaic Energy Association

kW – Quilowatt

m-Si - Silício monocristalino

MW – Megawatt

NEDO - New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japão)

ONG – Organização não Governamental

OPV - Células fotovoltaicas orgânicas

p-Si - Silício policristalino

PN - Positivo-negativo

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

REEE - Resíduos de Equipamento Eletroeletrônico

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

REP - Responsabilidade extendida do produtor

Sisnama - Sistema Nacional do Meio Ambiente

TCU - Tribunal de Contas da União

UE - União Europeia

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

WEEE - Waste Electrical & Electronic Equipment

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	MOTIVAÇÃO, RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA	13
1.2.	OBJETIVOS, QUESTÃO CENTRAL E HIPÓTESE.....	14
1.3.	METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO FV E COMPONENTES.....	17
2.2.	TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DOS MÓDULOS	20
2.3.	REGULAÇÃO DOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS	28
2.4.	ASPECTOS ECONÔMICOS DA RECICLAGEM	33
2.5.	IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E CICLO DE VIDA.....	37
3.	ANÁLISE DOS FATORES ENVOLVIDOS NA RECICLAGEM FV	42
3.1.	DISCUSSÃO NO ÂMBITO TECNOLÓGICO E ECONÔMICO.....	42
3.2.	LOGÍSTICA DA COLETA E RECICLAGEM.....	43
3.3.	QUADRO REGULATÓRIO DO DESCARTE FOTOVOLTAICO.....	46
3.4.	CONSIDERAÇÕES ADMINISTRATIVAS	48
3.5.	SUGESTÕES DE POLÍTICAS PÚBLICAS.....	48
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A humanidade sempre dependeu de recursos naturais para suas necessidades energéticas. Até pouco após o início da Idade Contemporânea o uso de madeira era comum para aquecimento, água e vento eram aproveitados pelo seu potencial mecânico e animais tracionavam veículos de transporte ou arado. Em meados do século XIX começa a era do petróleo, gás natural e carvão (sendo que este último já vinha sendo muito utilizado desde o começo da Revolução Industrial), todos recursos finitos cujo uso acarreta na emissão de gases de efeito estufa e outros subprodutos tóxicos (como NO₂ e SO₂) (UCSUSA, 2006).

Devido ao fato do seu usufruto do carvão e petróleo não necessitar de nenhum processamento altamente complexo e desses combustíveis fósseis serem abundantes e facilmente estocáveis, eles ganharam espaço como fonte de energia, de tal sorte que o desenvolvimento humano passou a se basear nestes insumos desde os primórdios de sua larga utilização (REVKIN, 2018). Adicionalmente, o efeito estufa é um fenômeno natural de vital importância para a Terra, pois regula a temperatura atmosférica. No entanto, ações antrópicas como a queima de combustíveis fósseis e a consequente emissão de gases estufa passam a minar o equilíbrio deste fenômeno, gerando o efeito conhecido como aquecimento global, ou seja, aumento da temperatura média dos oceanos e da atmosfera terrestres. De acordo com Revkin (2018), ao final da década de 1980 começa a conscientização a respeito deste problema e, desde então, as fontes de energias renováveis ganharam os holofotes, obtendo destaque os aproveitamentos do tipo solar e eólico.

Atualmente a energia solar pode ser utilizada para aquecimento de água (por meio de sistemas termossolares) ou obtenção de energia na forma elétrica (com painéis fotovoltaicos). O crescimento da tecnologia fotovoltaica (FV) em particular chama a atenção, pois em âmbito global passou de 23 gigawatts (GW) de potência instalada até 2009 para 627 GW em 2019 (REN21, 2020). Mesmo tendo uma pegada de carbono na etapa de produção, o emprego desta tecnologia é bem visado pois há ausência de emissão de gases estufa durante sua operação. No Brasil encontra-se grande potencial solar e as aplicações fotovoltaicas já somam mais de 7,2 GW instalados (ANEEL, 2020). Segundo um estudo da Empresa de Pesquisa Energética

(EPE), a estimativa de potencial de geração centralizada é de 307 GWp (equivalente a cerca de 1 bilhão de módulos ou 20,5 milhões de toneladas de painéis), incluindo somente sítios com condições ótimas de declividade, irradiação e área contínua, além de descontar terrenos protegidos por lei (reservas, matas nativas, etc.) (KANZEN, 2016). Ao se considerar a geração distribuída e condições abaixo da ótima, este número é maior ainda.

1.1. MOTIVAÇÃO, RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

Apesar de contribuir para a diminuição do aquecimento global na fase de operação, é necessário levar em conta todo o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos. Após o término da vida útil, que gira em torno de 25 a 30 anos, materiais como alumínio, vidro, pastilhas (*wafers*) de silício, polímeros e metais pesados viram resíduos. Com o rápido desenvolvimento do mercado de energia solar fotovoltaica nas duas últimas décadas é estimado que entre 60 e 78 milhões de toneladas deste equipamento cheguem ao fim do ciclo de vida até 2050 (IRENA, 2016). Sem ter bem delineado o final deste ciclo, fica evidente que o problema do acúmulo de resíduos fotovoltaicos é uma corrida contra o tempo. Existe um intervalo de apenas algumas décadas para aprimorar toda a questão em termos técnicos, logísticos, econômicos e legislativos.

Ainda que o reaproveitamento e reciclagem do alumínio e vidro já sejam comuns, é preocupante o destino dos outros componentes pelo risco ambiental de seu descarte. Já existem pesquisas no meio acadêmico desenvolvendo métodos de separação e obtenção das matérias-primas empregadas, mas não há uma cadeia de processos integrada bem definida que consiga reaver todos os insumos. Pela variedade de tecnologias fotovoltaicas existentes e a emergir, as rotas de reciclagem são diversas e a estratégia que definirá qual deve ser adotada em cada caso dependerá do interesse econômico da reciclagem (seja pela obtenção dos *wafers* de silício, seja pela obtenção de metais valorosos, como a prata). Os módulos fotovoltaicos podem ser enquadrados como resíduos de equipamento eletroeletrônico (REEE), porém possuem particularidades que os impedem de ser processados exatamente como tais. Em 2014 a massa de painéis fotovoltaicos representava em

apenas cerca de 0,1% do lixo eletrônico descartado mundialmente, enquanto que em 2050 a projeção é de que represente mais de 10% (IRENA, 2016).

Enquanto os processos de reciclagem deste eletrônico não atingirem a viabilidade econômica, serão necessárias políticas socioambientais que incentivem, regulamentem e fiscalizem a atividade. Em determinados lugares do mundo a lei já lança mão de mecanismos para minimizar os impactos, porém em alguns países, em especial aqueles subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (como é o caso do Brasil) a cultura da reciclagem é inexistente ou incipiente. Isto significa que nestas instâncias, antes de se estruturar a reciclagem fotovoltaica, um amplo trabalho deve ser feito quanto à reciclagem em geral, seguida da reciclagem direcionada aos REEE. Caso contrário, é esperado que graves problemas como contaminação de solo, água e ar incorram em doenças e desequilíbrios ambientais assim que começarem os descartes em grande volume deste produto.

Em 2010 foi instituída a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, uma resposta ao grande caos presente na gestão de resíduos brasileira. Esta apresenta incentivos e metas, além de traçar diretrizes para a logística reversa e responsabilidade compartilhada entre os setores, inclusive para o lixo eletrônico. No entanto, ainda há dúvidas quanto à interpretação desta política neste caso específico e sua reciclagem permanece incerta. Em um país com grande potencial solar, projeções de larga utilização da tecnologia fotovoltaica nas próximas décadas e proporções continentais como o Brasil é evidente a importância da reciclagem deste produto.

1.2. OBJETIVOS, QUESTÃO CENTRAL E HIPÓTESE

Perante a crescente preocupação na gestão deste resíduo, conforme exposto anteriormente, este trabalho tem por objetivo fundamental sintetizar um conjunto de diretrizes para o Brasil se preparar para gerir resíduos fotovoltaicos, em especial da tecnologia de silício cristalino (pois esta é a que domina o mercado atualmente). Tal intento pretende ser atingido a partir de estudos sobre a viabilidade técnica das diferentes rotas de reciclagem, experiência prévia em outros países, valor econômico desta atividade, legislações vigentes no mundo e no Brasil e impactos ambientais mapeados no ciclo de vida. Paralelamente, os objetivos secundários são:

(i) apresentar a evolução e um panorama atual da reciclagem de painéis fotovoltaicos no mundo; (ii) averiguar quais são os impactos econômicos e socioambientais; e (iii) sugerir pontos para uma possível legislação específica no Brasil.

A questão central deste estudo é: como deve o Brasil se preparar para a gestão de resíduos fotovoltaicos? Ao fim da vida útil dos módulos o número de descartes deste resíduo começará a crescer e o país deve estar preparado para isto.

Para responder a esta pergunta, são propostas as seguintes hipóteses: (i) a experiência internacional, notadamente a europeia, em seus diversos aspectos pode contribuir para a melhora da gestão deste resíduo no Brasil, assinalando quais as ações a serem tomadas pelo governo e mercado fotovoltaico e (ii) havendo sido criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, já existe boa base de mecanismos para que o problema seja abordado oportunamente.

1.3. METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a elaboração desta monografia a abordagem foi: (i) compreensão do problema e suas dimensões; (ii) organização da literatura pertinente ao assunto, revendo os conceitos-chave para se obter a profundidade necessária na discussão do que já foi estudado por outros autores; e por fim (iii) uma análise do que o Brasil deve fazer para melhorar a atual gestão deste resíduo, concluindo-se o trabalho com sugestões dos próximos passos, e de possíveis estudos posteriores neste tema.

No entendimento do problema o leitor foi situado quanto à relação do desenvolvimento da civilização e seu domínio sobre diferentes fontes de energia, ressaltando o porquê de a humanidade agora necessitar de fontes energéticas mais limpas e como as renováveis se encaixam neste contexto. Além disto, é explicado que para a abordagem ser completa, deve-se considerar todo o ciclo de vida de uma tecnologia, que neste caso é o elo faltante para a energia solar se consagrar como devidamente sustentável.

Na organização da literatura são levantados artigos, matérias, monografias de graduação e pós-graduação, além de relatórios de organizações nacionais e internacionais, todos no tema da reciclagem de eletroeletrônicos e de dos módulos FV em específico. A análise crítica considera as informações e conclusões mais

pertinentes do material revisto, resultando em uma série de observações e sugestões a serem levadas em conta no caso de o Brasil traçar uma política específica para a gestão deste resíduo.

Além desta introdução, que discorre inicialmente sobre a problemática, sua importância no futuro próximo, aponta os objetivos que se deseja alcançar com este trabalho e relata quais são as hipóteses iniciais, o tema será desenvolvido em mais dois capítulos: a Revisão Bibliográfica e Análise dos Fatores Envolvidos na Reciclagem FV.

Para Revisão Bibliográfica, organizou-se as informações essenciais para o entendimento mais amplo do problema na seguinte ordem de aspectos: (i) tecnologias de aproveitamento fotovoltaico, (ii) tecnologias de reciclagem de módulos FV e REEE, (iii) regulação no mundo e no Brasil, (iv) economia da reciclagem e (v) impactos socioambientais. Com isto, deseja-se demonstrar o panorama atual da reciclagem e as próximas tendências.

No capítulo seguinte, é feita uma análise, destacando os fatos mais relevantes de cada informação revista na bibliografia e como estes se encaixam para compreender a questão. Então, considerações sobre como o Brasil deve abordar o tema são expostas e sugere-se quais poderiam ser os próximos passos. Por fim, algumas propostas de trabalhos futuros são citadas e as maiores limitações encontradas para a realização deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o melhor entendimento da questão é preciso compreender os diversos aspectos que influem na viabilização da reciclagem de módulos fotovoltaicos. Logo, o intuito deste capítulo é apresentar os pontos relativos à sua constituição material, abordagens já utilizadas em sua reciclagem, quadro regulatório deste tipo de resíduo, aspectos econômicos preponderantes no problema e impactos socioambientais atrelados ao descarte inadequado presentes na literatura.

2.1. TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO FV E COMPONENTES

Um painel solar fotovoltaico é basicamente constituído por células de um elemento semicondutor junto a camadas semicondutoras com dopagem (adição de elementos que capturam ou desprendem elétrons) – também chamadas de junção PN, filamentos condutores entre células solares (podendo conter prata, cobre, alumínio, chumbo e estanho), um substrato plástico fluorado (*backsheet*) e/ou fundo rígido sobre o qual se apoia o conjunto de células (BORLACE, 2020), e no caso de painéis rígidos, um encapsulante (geralmente EVA), vidro, caixa de junção (considerada um REEE) e um quadro externo (alumínio) para proteção e fixação (GHIZONI, 2016). A Figura 1 ilustra as camadas que compõem um painel solar fotovoltaico típico de células de silício.

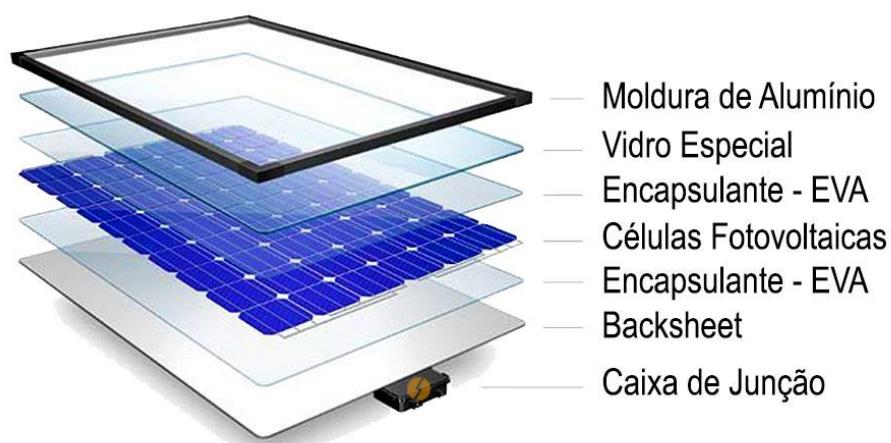


Figura 1 - Composição de um módulo fotovoltaico de silício cristalino

Fonte: PORTAL SOLAR (2020).

As tecnologias diferem fundamentalmente no material semicondutor. Muitos autores classificam as tecnologias em três gerações (MONIER & HESTIN, 2011; DIAS, 2015; PRADO, 2018; VALADARES, 2019).

A primeira é composta pelos módulos que utilizam células de silício cristalino (c-Si), subdivididos em estrutura monocristalina (m-Si) e policristalina (p-Si). Via de regra, células monocristalinas são as mais eficientes dentre as disponíveis comercialmente no momento, porém são mais caras e geram mais resíduos de silício do que células policristalinas em sua produção (PORTAL SOLAR, 2020).

A segunda geração é composta de filmes finos, sendo estes: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e seleneto de cobre e índio (CIS). Nestes tipos a célula é fabricada por deposição de material sobre um substrato, que pode ser flexível, ao contrário da primeira geração. Em geral são menos eficientes que células c-Si, mas apresentam melhor desempenho sob altas temperaturas. Necessitam de uma quantia menor de material e energia para serem produzidas, porém a utilização de metais pesados, especialmente o cádmio traz preocupações quanto ao seu descarte (FEDKIN & DUTTON, 2013).

Na terceira geração se enquadram as tecnologias emergentes (DIAS, 2015), ou ainda, aquelas que alcançam eficiência elevada, baixo custo com processos de fabricação de filme fino e uso de materiais não tóxicos (CONIBER, 2008). Consta nesta categoria os módulos de concentrador fotovoltaico (CPV), *dye-sensitized solar cell* (DSSC), células orgânicas (OPV) e híbridas (combinação de c-Si e a-Si), todas com pouca participação no mercado atualmente ou em desenvolvimento. Além de considerar a composição dos módulos, é importante verificar como cada tecnologia se coloca no mercado atualmente. A gestão do final da vida útil de um painel varia de uma tecnologia para outra, tendo em vista que diferentes materiais são empregados. Como pode ser observado na Figura 2, a grande maioria dos módulos a serem descartados futuramente no mundo todo será de silício cristalino. No Brasil a tendência é a mesma. Conforme é mostrado na Tabela 1 os módulos importados de silício cristalino são a maior parte. Os painéis montados nacionalmente não chegam a representar nem 5% do mercado brasileiro (GREENER, 2020b). Por este motivo, este estudo focará nos painéis c-Si.

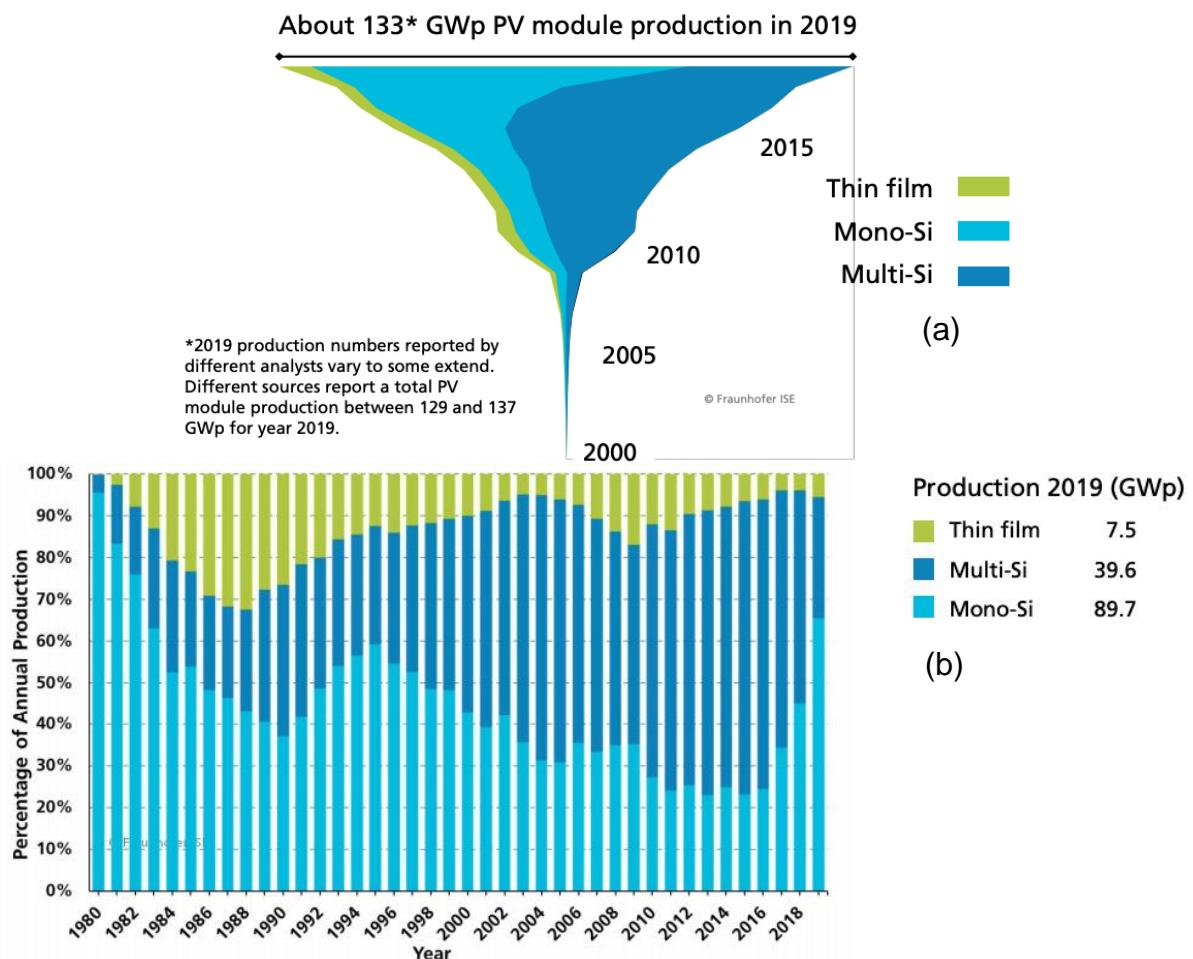


Figura 2 - Marketshare absoluto (a) e relativo (b) das tecnologias fotovoltaicas 2000-2019
Fonte: FRAUNHOFER ISE (2020).

Tabela 1 - Marketshare de tecnologias no mercado Brasileiro de 2017 a 2020

Tecnologia	2017	2018	2019	2020*
Filme fino	7,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Monocristalino (m-Si)	2,3 %	7,9 %	23,8 %	40,5 %
Policristalino (p-Si)	89,9 %	92,0 %	76,2 %	59,5 %

* O ano de 2020 está contabilizado de janeiro até setembro

Fonte: elaboração própria com base nos dados de GREENER (2020a).

A Tabela 2 apresenta a configuração de materiais constituintes para alguns modelos de placa solar de silício cristalino de 60 células. Observa-se que o vidro e o alumínio são os materiais com maior presença e consequentemente seu reaproveitamento é o primeiro passo para viabilizar a reciclagem. É importante ressaltar que a composição de materiais, juntamente com o rendimento de reciclagem são dois fatores que pesam muito nesta viabilidade econômica. Deng *et al.* (2019) concluem que modelos de painel sem quadro de alumínio prejudicam muito a

rentabilidade da reciclagem, uma vez que este material é o que se encontra em segunda maior quantidade, tem baixo custo de recuperação e possui bom valor de revenda. Este fato está diretamente relacionado ao envolvimento dos fabricantes no problema com *designs* favoráveis, pensados para o momento que o produto atinge o final de sua vida útil.

Tabela 2 - Composição de massa a cada 1000 kg de painéis de cinco modelos

	Padrão	Conexões avançadas (sem Pb)	Sem quadro de Al	Sem quadro de Al + Vidro duplo	Sem quadro de Al + Vidro duplo + bifacial
Massa de um módulo (kg)	20,0*	19	17	23	23,5
Composição da massa em 1000kg de módulos FV (kg)					
Caixa de Junção	20*	21,1*	23,5*	17,4*	17,0*
Vidro	680*	695	766	890	887
Quadro de Al	180	190	0	0	0
Al interno	5	5	5	0	0
Cobre de cabos	3,3	5,3	5,9	4,9	4,3
Cobre de tiras internas	1,1	0,0*	7,4	5,4	5,3
EVA	51	36,7	44,3	30,3	29,7
<i>Backsheet</i>	15	4,8	11,7	0	0
Revest. de cabos	6,6	5,3*	5,9*	4,4*	4,3*
Silício	36,5	32,5	36	26,9	26,3
Prata	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5*
Outros metais (Sn, Pb, etc.)	0,285*	0,0*	1,8*	1,4*	1,3*

Fonte: DENG *et al.* (2019).

2.2. TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DOS MÓDULOS

Há diversas possibilidades para a destinação de painéis que chegaram ao final da vida útil. A mais comum é a disposição em aterros sanitários, seja em aterros de classe I (resíduos perigosos), IIA ou IIB (não perigosos - não inertes e inertes, respectivamente). Há também a incineração e o reuso, através de uma readequação ou troca de componentes. A outra opção é a reciclagem, que pode ser feita em plantas especializadas na recuperação do vidro, metal ou dedicadas exclusivamente aos módulos FV (ainda que só exista uma destas na França operando comercialmente no

momento). Rotas de reciclagem costumam ser classificadas em duas vertentes: *alto valor (upcycling)* e *baixo valor (downcycling)*. No caso da reciclagem fotovoltaica é comum que antes de qualquer processamento, a caixa de junção e quadro de alumínio sejam removidos, a primeira vendida como REEE e o segundo como alumínio reciclado.

Na *reciclagem de alto valor*, materiais como o vidro, wafers de silício e metais possuem alta pureza na saída do processamento, podendo ser utilizados na fabricação de novos painéis solares, ou vendidos para outras indústrias. Este tipo de reciclagem possui custos mais elevados, porém traz uma receita maior. Aqui há o benefício de separar e destinar corretamente componentes tóxicos e evitar o dispêndio de energia na fabricação de componentes que serão reaproveitados.

Já na *reciclagem de baixo valor*, são recuperados materiais misturados com grau de pureza variável – a depender da complexidade dos mecanismos de separação – porém menor do que no *upcycling*. Consequentemente, as saídas do processo têm menor preço de venda. Nesta categoria menos energia é consumida, porém metais pesados podem estar misturados nos produtos finais, e uma quantia adicional de energia será empregada para transformar esta matéria prima em outros produtos.

Quanto aos processos de reciclagem, podem ser mecânicos, térmicos, químicos, criogênicos e a *laser*. A seguir, um resumo destes:

- (i) Mecânicos: corte, Trituração, moagem, remoção manual ou com auxílio de máquinas, delaminação (separação das diversas camadas constituintes do módulo) com facas quentes, peneiramento, além de separações óticas e magnéticas.
- (ii) Térmicos: pirólise do encapsulante por elevação da temperatura; queima direta do encapsulante. Em ambos os casos o encapsulante se torna combustível, economizando energia, mas requisitando o tratamento nos gases de queima. Este processo pode ser feito com material triturado ou o módulo inteiro.
- (iii) Químicos: dissolução do encapsulante em solventes orgânicos ou inorgânicos (segundo Radziemska & Ostrowski [2009] e Wambach & Born [2004] este método se demonstrou menos viável economicamente do que separação térmica); lixiviação e precipitação de metais; decapagem de

camada antirreflexo e junções P e N do silício. Os processos químicos podem requisitar um posterior tratamento de efluentes, além do manuseio de seus reagentes serem perigosos.

- (iv) Criogênicos: resfriamento na delaminação para enfraquecer a estrutura de ligação interfacial do material adesivo (DENG *et al*, 2019). Em relação às outras é uma tecnologia incipiente.
- (v) Laser: utilizado para purificar a pastilha de silício, removendo a camada antirreflexo, metalizações e junções PN (DIAS, 2015). Também é uma tecnologia em desenvolvimento.

Dependendo dos materiais que se pretende obter ao final da reciclagem, diferentes combinações de processos podem ser utilizadas. Por exemplo, para obtenção de vidro triturado a pirólise pode ser efetuada após os processos mecânicos para reduzir impurezas de material polimérico e obter um vidro de valor maior. Paralelamente, é possível utilizar processos térmicos na delaminação antes da fragmentação mecânica e obter o vidro e *wafers* de silício intactos – a serem tratados quimicamente para reuso na produção de novas células fotovoltaicas. A Figura 3 mostra dois exemplos de sequência de processos com produtos bem diferentes. A sequência de *baixo valor* lança mão de variados processos mecânicos, podendo utilizar ou não processos químicos e térmicos posteriormente, para refinar o vidro obtido ao final. Já a de *alto valor* está representada de forma simplificada, mas conta com os três tipos principais de processos. De forma geral, o *upcycling* é diferenciado do *downcycling* na reciclagem de painéis de c-Si pela complexidade e energia gastos na etapa de delaminação para obter vidro o mais puro possível e pastilhas de silício intactas.

Deng *et al.* (2019) compararam quatro cenários: (a) disposição em aterros sanitários; (b) trituração e reciclagem simples obtendo vidro moído contaminado; (c) delaminação mecânica e tratamento químico simples obtendo placas de vidro, silício em pó, fita de cobre, prata e energia térmica; e (d) processos térmico e químico complexo, obtendo placas de vidro, *wafers* de silício, fita de cobre, prata e energia térmica. Eles concluem que nas condições estudadas, o aterramento ainda é o mais viável, sendo a reciclagem simples de vidro viável apenas quando taxas de aterro são altas o suficiente, ou quando proibida a disposição dos módulos em aterros (ainda

assim, com ressalvas). Ao aterrhar, muitos materiais finitos perdem a possibilidade de serem reutilizados, enquanto materiais como vidro e pastilhas de silício têm uma produção energointensiva. Portanto, é recomendado que as tecnologias de *alto valor* - (c) e (d) - continuem sendo aprimoradas até que reduzam em pelo menos 30% seus custos para se tornarem viáveis. Além disso, foi recomendada uma administração logística mais otimizada do recolhimento dos painéis e incentivo a *designs* que facilitem a desmontagem no seu final de vida útil.

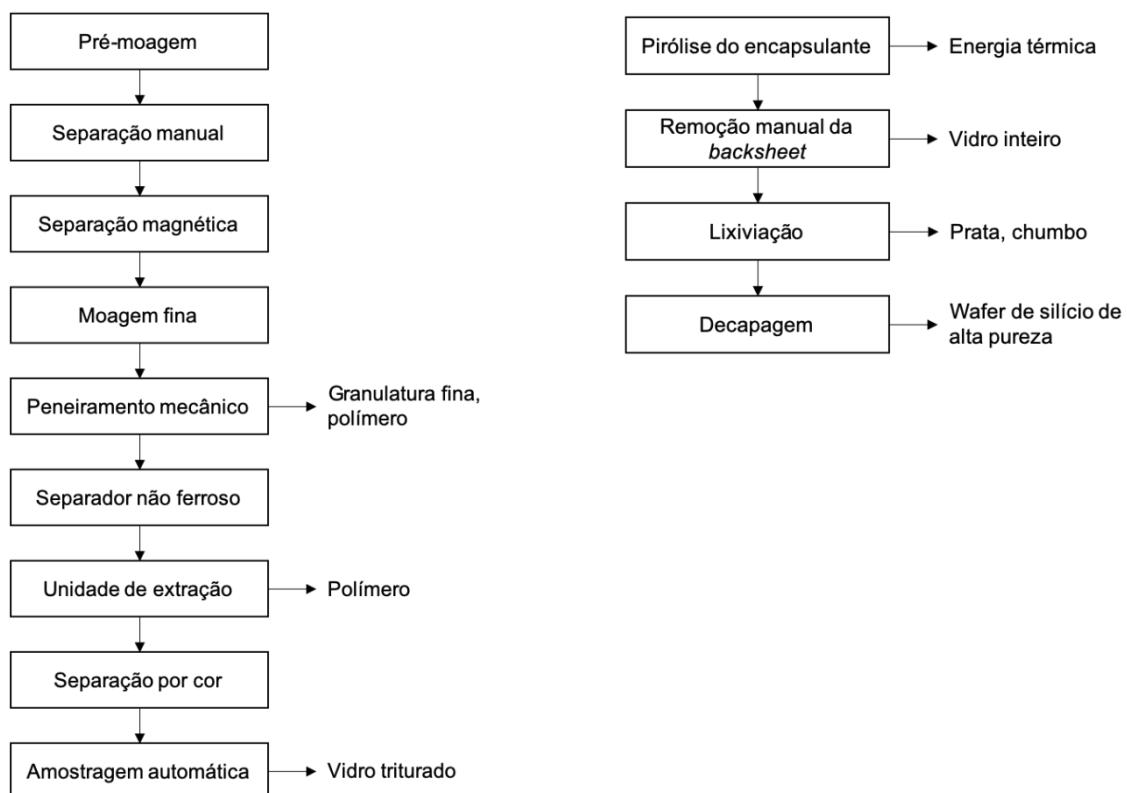


Figura 3 - Cadeia de processos para reciclagem de baixo e alto valor, respectivamente

Fonte: adaptado de IRENA (2016) e DENG *et al.* (2019).

2.2.1. Experiência internacional na reciclagem de resíduos FV

O website ENF Solar é um diretório de produtos e serviços de todo o mercado de energia solar fotovoltaica, onde as entradas são cadastradas pelas próprias empresas. A página fornece uma lista de recicladores, fornecedores de equipamentos de reciclagem ou comercializadores de materiais fotovoltaicos reciclados (muitos dos quais participam do mercado de reciclagem de REEEs, vidro e

metais também). Dados desta lista foram agrupados na Tabela 3 e podem fornecer um panorama da atividade em âmbito global (com a ressalva de que algumas das entradas da lista são projetos para pesquisa e desenvolvimento).

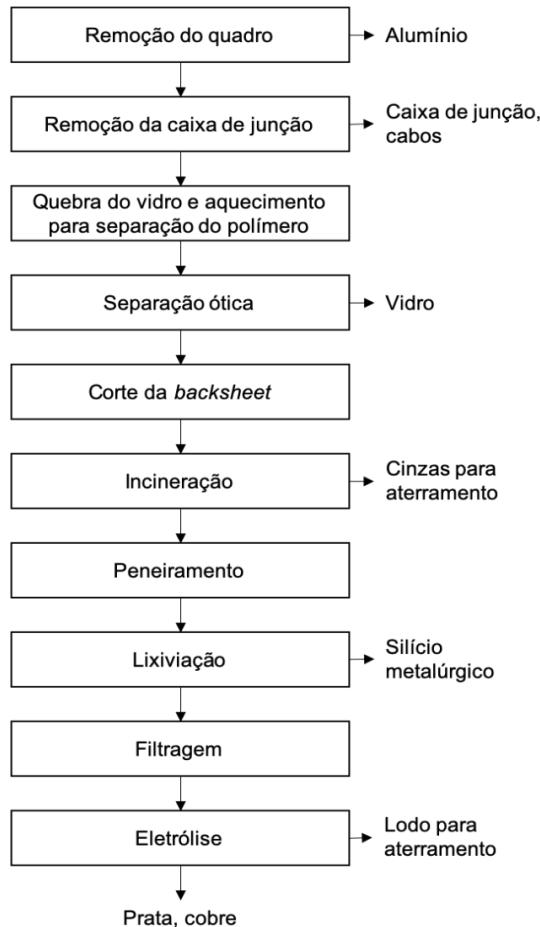
Tabela 3 - Dados sobre empresas do mercado de reciclagem fotovoltaica

Parâmetro	Quantidade
Empresas comercializadoras de materiais reciclados	18
Empresas comercializadoras de equipamento de reciclagem	8
Empresas recicadoras	61
Total de empresas	72
Materiais reciclados	
Empresas reciclando wafer ou células	21
Empresas reciclando lingotes de silício	12
Empresas reciclando vidro	8
Empresas reciclando pasta de metalizações	8

Fonte: elaboração própria a partir de ENF SOLAR (2020).

O projeto alemão Deutsche Solar AG (uma vertente subsidiária da empresa SolarWorld AG) iniciou em 2003 e já na década de 2010 não estava mais em operação pelo alto custo e baixa demanda. O processo desenvolvido consistia no tratamento térmico para a remoção de materiais poliméricos, seguido pela separação manual do vidro (que poderia sair intacto), wafers de silício, alumínio, aço e cobre. Depois, os wafers eram submetidos a processos químicos, na seguinte ordem: remoção de metalizações, camada antirreflexo e junção PN, acabamento superficial, enxágue e secagem. O índice de reciclagem atingido era de aproximadamente 80% (MONIER & HESTIN, 2020).

Em 2014 iniciou-se um projeto chamado *Full Recovery End of Life Photovoltaic* (FREL) financiado pela União Europeia (UE) com o objetivo de recuperar 100% dos materiais presentes nos painéis. Por motivos comerciais e baixa demanda, o processo piloto foi interrompido ao final do projeto. Nesta iniciativa, a empresa de mineração italiana Sasil desenvolveu e patenteou um processo industrial envolvendo etapas mecânicas, térmicas e químicas, como mostrado na Figura 4. Neste caso não são recuperadas as células solares, mas sim um silício de grau metalúrgico. Um índice de reciclagem de 93% foi reportado ao final da fase de testes (FREL, 2015), com outros aproveitamentos específicos apontados na Tabela 4.

**Figura 4 - Processo do projeto FRELP**

Fonte: WAMBACH (2017).

Tabela 4 - Índices de reciclagem do projeto FRELP por material

Material obtido	Porcentagem da massa reciclada
Alumínio	18%
Conectores elétricos	1%
Vidro branco de alta qualidade	70%
Silício de grau metalúrgico	3,65%
Prata e cobre	0,17%
Resíduos gerados	Massa a cada 1000 kg
Hidróxidos metálicos	20 kg
Emissões de NOx na eletrólise	2 kg
Cinzas	5 kg
Nitrato de cálcio dos processos químicos	120 kg

Fonte: FRELP (2015).

Uma organização sem fins lucrativos chamada PV Cycle foi fundada na Bélgica em 2007 para atender a demandas de gestão de resíduos do mercado de placas solares e eletroeletrônicos mais diretamente na União Europeia. A instituição

conta com associados de várias localidades e fornece diversos serviços, como reforma de painéis, descomissionamento de usinas fotovoltaicas, um esquema de coleta e tratamento dos resíduos, consultorias de conformidade legal, treinamentos e outras soluções. A PV Cycle não possui plantas de reciclagem, mas é uma administradora – que eventualmente atua com alguns serviços próprios – e que recorre a empresas parceiras nestas localidades para de fato efetuarem a reciclagem, sempre cumprindo as normas europeias que regulamentam a atividade. França e Itália são as regiões que mais reciclam através desta organização. Até o momento, é a organização que apresentou maior índice de recuperação dos materiais em termos de massa, conforme é verificado na Figura 5.

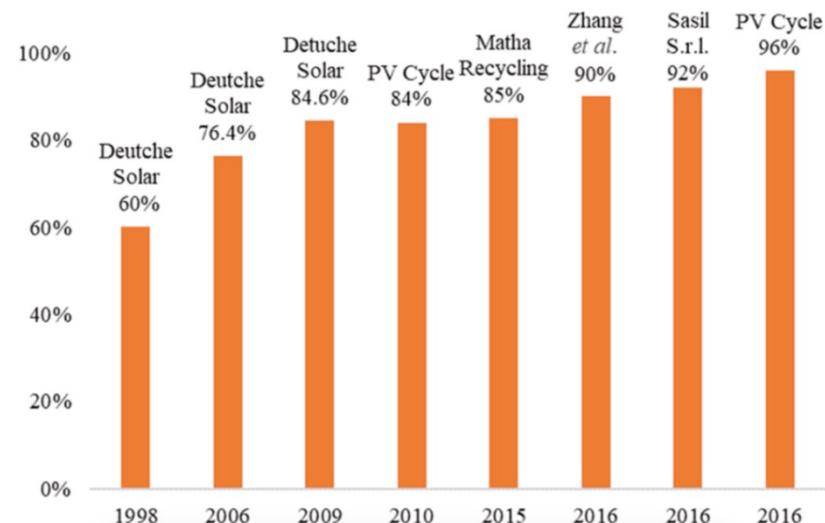


Figura 5 - Progresso da recuperação de material na reciclagem de módulos de silício
Fonte: DENG *et al.* (2019).

Na França, a empresa Veolia venceu uma licitação de reciclagem da PV Cycle e desde junho de 2018 opera uma planta voltada exclusivamente para os painéis de silício com capacidade anual de quatro mil toneladas. A Tabela 5 mostra alguns dados reportados nos últimos relatórios anuais. Definitivamente a experiência da PV Cycle será essencial para o sucesso da reciclagem fotovoltaica em outros lugares do mundo.

Tabela 5 - Dados de reciclagem da PV Cycle de 2017 a 2019

	2017	2018	2019
Massa de módulos reciclada (t)	4.153	7.296	11.514
Participação da França em massa	59%	46%	42%
Participação da Itália em massa	25%	38%	42%
Porcentagem de módulos de silício	54%	95%	81%
Porcentagem de módulos de CdTe	43%	2%	9%

Fonte: PV CYCLE (2017, 2018, 2019).

A empresa FirstSolar, produtora de módulos de filme fino possui instalações capazes de reciclar esta geração de painéis nos EUA, Alemanha, Malásia e Vietnam. No Japão diretrizes voluntárias foram publicadas pela *Japan Photovoltaic Energy Association* (JPEA) para garantir a reciclagem apropriada, enquanto muitas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento foram empreendidas pela *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO) para métodos viáveis de reciclagem. Na Índia, há uma capacidade instalada de reciclagem de REEEs registrada de apenas 22% do volume estimado de lixo eletrônico (SURESH, SIGHVI, & RUSTAGI, 2019). A China, apesar de ter se tornado a líder em capacidade instalada, conta com poucas iniciativas e a própria agência de proteção ambiental não estudou a questão ainda. A respeito de pesquisa, alguns fabricantes chineses como Trina e Yingli estudam o problema, e o Instituto de Pesquisa de Ciência Ambiental está conduzindo uma avaliação dos impactos da indústria fotovoltaica no meio ambiente, porém tais esforços são recentes e lá ainda não é possível encontrar muitos módulos no final da vida útil para pesquisa (XU *et al.*, 2018). Nos EUA a empresa Recycle PV Solar utiliza processos baseados na experiência da União Europeia e garante obtenção de 90% do material reciclado. (RECYCLE PV SOLAR, 2020).

Na Austrália há apenas uma empresa realizando esta reciclagem, a Reclaim PV, em Adelaide. Por enquanto ainda se encontra operando em uma escala reduzida, realizando pesquisa e desenvolvimento em paralelo com a Universidade de Flinders e refinando seu modelo de negócio e organização logística, uma vez que o amplo território australiano impõe dificuldades neste sentido. Utiliza processos térmicos e mecânicos, indicando que a empresa visa obter vidro de *alto valor*. Os maiores fabricantes de painéis (nomeadamente Canadian Solar, Q-Cells, Yingli, SunPower e Suntech) com presença na Austrália trabalham em parceria com esta

empresa. Há intenção de disponibilizar pontos de coleta futuramente (FILATOFF, 2019; RECLAIM PV, 2020).

A empresa SunR é pioneira na reciclagem fotovoltaica em toda a América Latina e está sediada em Florianópolis, SC. Conta com um processo baseado em tecnologia europeia, capaz de recuperar alumínio, vidro, prata, cobre, silício e telúrio, a depender do tipo de módulo reciclado. Processos manuais, mecânicos, incineração e químicos são utilizados. O que viabiliza este negócio é o modelo logístico, que firma parceria com integradores exclusivos para cada região nas atividades de descomissionamento, e em troca a recicladora pode utilizar o espaço do integrador para armazenar os painéis até que se torne economicamente viável o transporte ao centro de reciclagem, localizado em São Paulo (ARAUJO, 2020).

2.3. REGULAÇÃO DOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

Como a reciclagem dos painéis fotovoltaicos nem sempre é atrativa economicamente, é comum que as iniciativas neste âmbito sejam isoladas e temporárias. Por este motivo, é necessário que governos que já fazem grande uso da energia solar incorporem esta questão em suas políticas ambientais. Com incentivo e subsídios a atividade pode ser mantida e consequentemente aprimorada por meio da experiência prática de empresas e pesquisa acadêmica. Além disto, sem uma regulação específica os custos advindos dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado acabam sendo externalizados pelos envolvidos neste mercado e rateados entre a sociedade. Ou seja, a regulação desta atividade atuaria para direcionar tais custos sociais para quem usufrui os benefícios da energia solar fotovoltaica. Um exemplo disto é a proibição em determinados lugares da exportação de resíduos perigosos para países com fraca regulação ambiental (CHOWDHURY *et al.*, 2020).

2.3.1. Regulação na União Europeia

Apesar de universidades da Europa investigarem desde a década de 1990 a reciclagem de módulos FV, apenas em 2012 o problema foi abordado no âmbito legal. Em 2002 foi criada a diretiva de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos e

em 2012 revisada para incluir a gestão de resíduos dos painéis (*The Waste Electrical and Electronic Equipment [WEEE] Directive 2012/19/EU*), enquanto em 2014 padrão suplementar definiu requisitos para coleta, logística, e tratamento para os painéis (TS 50625-6). A diretiva requer que os países membros da UE implementem quadros regulatórios que tornem obrigatórios o monitoramento, coleta e tratamento dos resíduos. Desta forma, fabricantes, distribuidores, integradores e importadores vendendo seus produtos e serviços na UE ficam responsáveis por custear a destinação correta dos módulos ao final da vida destes. Consumidores residenciais ou não-comerciais não têm responsabilidade pela reciclagem dos módulos, ficando esta incumbida aos comercializadores – este conceito é denominado Responsabilidade Estendida do Produtor (REP). Estes agentes possuem algumas opções para financiar os custos da reciclagem, arcando isoladamente com eles ou participando de iniciativas coletivas (como é o caso da PV Cycle, mencionado na seção 2.2.1. deste trabalho). Além de discorrer sobre a (i) responsabilidade; esta diretiva aborda (ii) metas para coleta, recuperação e reciclagem; (iii) requerimentos para o tratamento; e (iv) conscientização de consumidores - que devem ser claramente informados pelo seu vendedor dos mecanismos de descarte apropriado, retorno ou coleta, por meio de etiquetas. Todos os países-membro da UE incorporaram a diretiva em suas legislações nacionais (SURESH *et al.*, 2019; GHIZONI, 2016). No Quadro 1 são mostradas as metas de coleta, recuperação e reciclagem da União Europeia para diferentes períodos após a imprementação da Diretiva.

Quadro 1 - Metas da diretiva de REEE da União Europeia

Diretiva	Período	Coleta	Recup.	Recicl.
REEE 2002	2003-12	4 kg / habitante / ano	75%	65%
REEE 2012	2012-16	4 kg / habitante / ano	75%	65%
	2016-18	45% (de massa) por <i>marketshare</i> nos três anos anteriores	80%	70%
	2018 em diante	65% (de massa) por <i>marketshare</i> nos três anos anteriores ou 85% dos resíduos gerados	85%	80%

Fonte: SURESH *et al.* (2019).

2.3.2. Regulação nos Estados Unidos da América

Os EUA não possuem legislação federal quanto à disposição de resíduos fotovoltaicos. O estado de Washington foi pioneiro no país e conta com uma lei de incentivo a empregos solares (*Solar Incentives Job Bill ESSB 5939*) vigorando desde de julho de 2017. Tal lei estabelece que fabricantes vendendo suas unidades solares dentro do estado a partir de 1º de julho de 2017 são responsáveis por financiar e apresentar um programa de reciclagem para suas unidades. Os que não cumprirem tal requisito até 1º de janeiro de 2021 não poderão vender módulos FV (NPSC, 2017). No entanto, sem um quadro regulatório federal é possível transportar os resíduos para estados vizinhos onde o descarte inapropriado é legal (SURESH *et al.*, 2019).

No estado da Califórnia é esperado que uma lei seja aprovada designando os painéis FV como “resíduo universal”, uma subcategoria de resíduos perigosos. Atualmente os módulos já são classificados como resíduos perigosos, no entanto, ao mudar para resíduo universal, a disposição passa a ser mais simples e econômica, sem deixar de ser segura. Isto porque esta subcategoria de resíduo possui canais de processamento mais amplos, e já realiza a gestão residual de produtos como lâmpadas fluorescentes e baterias. Esta mudança pode inclusive viabilizar logicamente a coleta e transporte dos módulos para centros de reciclagem, pois atualmente estes podem permanecer somente por noventa dias no local da instalação, enquanto na nova designação a permanência poderá chegar até um ano, o que permitirá armazenagem até que se acumule quantidades que justifiquem o envio para uma facilidade de reciclagem (BANDYK, 2020).

No estado de Nova York tramita na assembleia legislativa a lei S2837B, que imputa aos fabricantes, individualmente ou coletivamente, a responsabilidade de coletar, transportar e reciclar os painéis obsoletos, sem cobrança de qualquer taxa. Também devem participar ativamente em programas de educação e conscientização relativas a este assunto, listar quais são os atacadistas deste produto no estado (com loja física ou virtual), reportar o progresso anualmente ao Departamento de Conservação Ambiental, manter um *website* com informações diversas (incluindo onde consumidores e empreiteiros podem encontrar pontos de coleta), além de outras ações assertivas no mesmo âmbito (ESTADO DE NOVA IORQUE, 2017).

2.3.3. Regulação específica de REEEs no mundo

No Japão não há legislação regulando o que deve ser feito aos painéis fora de serviço, no entanto a indústria toma iniciativa voluntária neste âmbito e diretrizes para boas práticas de descarte foram publicadas pela *Japan Photovoltaic Energy Association* (JPEA). Na China também não há regulação quanto aos módulos, nem são eles considerados lixo eletrônico. Apesar disto, o último plano quinzenal (2016-2020) declara que o conceito de REP será aplicado para o gerenciamento de resíduos em geral, o que significa que em breve o descarte de painéis solares pode ganhar o foco de legisladores. A Índia, assim como a China, é um caso onde há grande avanço do mercado solar fotovoltaico, mas a legislação para o descarte dos resíduos é inexistente. Há diretrizes do Ministério de Energias Novas e Renováveis para que sistemas conectados na rede ao serem descomissionados sigam as regras de gestão de REEEs, porém há incoerência, pois tais regras não abrangem módulos fotovoltaicos. Na norma de gestão de lixo eletrônico constam alguns instrumentos interessantes para garantir a conformidade dos agentes envolvidos e sociedade, como uso de sistemas de troca do lixo por dinheiro ou créditos (*Exchange*), ou a retenção de um depósito feito na compra do produto que é devolvido quando o consumidor fizer a devolução para descarte (SURESH *et al.*, 2019).

A Austrália ainda não conta com um quadro regulatório específico, mas seu governo federal já trabalha na questão através de um programa nacional liderado pelo estado de Victoria. O objetivo é operar junto com a indústria, fazendo recomendações e co-regulações. O descarte de lixo eletrônico em aterro é proibido em algumas regiões do país, e uma prática comum é a coleta e armazenagem por parte dos fabricantes (SHIBANI, 2020; SUSTAINABILITY VICTORIA, 2020).

2.3.4. Regulação de REEEs no Brasil

O Brasil ainda não possui regulação específica para módulos fotovoltaicos. No entanto, em 2010 foi estabelecida a Política Nacional de Resíduos Sólidos pela lei nº 12.305/2010 e regulada pelo decreto nº 7.404/2010. A política se baseia nos conceitos de responsabilidade compartilhada e logística reversa, onde todos os agentes se responsabilizam por uma parte do processo da gestão dos resíduos

sólidos e retorno dos materiais empregados ao ciclo produtivo. Desta forma, cabe aos consumidores a devolução dos produtos e embalagens aos comerciantes e distribuidores ao final da vida útil. Estes devem encaminhar aos fabricantes e importadores, que por sua vez deverão dar destinação ambientalmente adequada a estes materiais (como reciclagem e reuso), e o rejeito encaminhado para disposição final ambientalmente adequada, alinhado às diretrizes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e ao plano municipal da gestão integrada dos resíduos sólidos, caso exista (ABDI, 2013). Vale lembrar que a PNRS também estabelece a meta de fechar todos os lixões até 2014, mas em 2018 havia ainda quase três mil unidades operando no Brasil (TCU, 2018). O aterro é na maioria das vezes a escolha para destinação de resíduos pouco discutidos como os módulos FV, e quando estes são destinados a lixões o potencial de contaminação ambiental é muito maior.

De acordo com a PNRS os painéis poderiam ser considerados REEEs, uma vez que é um equipamento que depende de corrente elétrica para seu funcionamento. No entanto, não configuram na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos compilada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e a classificação exata quanto à gestão do resíduo fotovoltaico é pouco discutida. Além disso, podem ser classificados como resíduos perigosos ou não, a depender dos níveis de substâncias tóxicas presentes no produto. Chumbo e prata são dois elementos tóxicos comuns na tecnologia de silício cristalino, sendo seus limites máximos determinados pela NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pelo ensaio de lixiviação (tal procedimento mede a capacidade de transferência de substâncias presentes no resíduo sólido por dissolução em meio extrator) (OLIVEIRA, D., LEBENSOLD & OLIVEIRA, L., 2017).

Duas experiências brasileiras documentadas sobre a destinação de placas são o Complexo Solar Guaimbê, no interior paulista e as Usinas Solares Fotovoltaicas de Pirapora, em Minas Gerais. No primeiro caso, colaboradores da empresa geradora de energia iniciaram um projeto piloto para recuperar a reutilizar as placas descartadas. Através de uma reforma, as placas selecionadas passaram a funcionar novamente, ainda que com desempenho menor, eletrificando cercas de demarcação no local. O outro empreendimento conta com um plano de controle ambiental, onde consta que os painéis fotovoltaicos serão encaminhados diretamente ao fabricante

dos modelos utilizados (CANAL ENERGIA, 2020; SOLATIO ENERGIA, 2016) ao final de sua vida útil. Ou seja, em ambos os casos as noções de responsabilidade compartilhada e logística reversa foram utilizadas, mesmo sem uma legislação específica orientando um procedimento padrão.

2.4. ASPECTOS ECONÔMICOS DA RECICLAGEM

Até o momento a maioria das iniciativas de reciclagem de painéis fotovoltaicos não tem se mostrado viável economicamente, necessitando de incentivos e consciência ambiental por parte de empresas e governos para existir. Materiais reciclados naturalmente possuem preço de venda menor do que matéria-prima virgem no mercado, pois algum nível de impureza sempre está associado a este processo. Para obtenção de produtos mais puros e uma consequente receita mais volumosa, há um *trade off* no emprego de métodos mais custosos por necessitarem de mais energia, gestão de resíduos (químicos e de combustão) e mão de obra com maior nível de qualificação.

A reciclagem intrinsecamente concorre com aterros de classe I (resíduos perigosos, caso dos modelos de painel fotovoltaico com concentração de elementos tóxicos acima do limite constante na norma NBR 10.004/2004) ou classe II (resíduos não perigosos, nos casos restantes). Ou seja, em muitos lugares para tornar atrativa a reciclagem o preço do aterramento deve ser maior, ou esta prática deve ser proibida (DENG *et al.*, 2019). Outro fator que impede esta viabilização atualmente é o fluxo de painéis fora de serviço. Aparentemente muitas iniciativas estão suspensas, observando o mercado até o momento que o número de painéis descartados passe a aumentar consideravelmente. Deng *et al.* (2019) realizaram estimativas com uma operação capaz de reciclar 7.000 t/ano e ainda assim apontam que os custos de processos mecânicos e térmicos deveriam diminuir em 30%. Segundo os mesmos autores, a reciclagem de vidro provavelmente se tornará a opção viável para evitar aterros enquanto a *reciclagem de alto valor* não superar os desafios tecnológicos.

É crucial visar a recuperação de recursos naturais através de métodos sofisticados e eficientes para garantir a sustentabilidade desta indústria a longo prazo. O silício, por exemplo, que apesar de abundante na crosta terrestre e se encontrar na composição de diversos minérios, somente como quartzo (SiO_2) – cuja ocorrência é

de apenas 12% em relação a outros minerais contendo este elemento – é viável de se obter para aplicação eletrônica ou fotovoltaica, devido à alta concentração. Além disto, o alto consumo energético demandado pelo processo de obtenção dos wafers de silício (Processo Czochralski), pode ser um incentivo à recuperação das células solares intactas (VALADARES, 2019). Tal fato é corroborado por Dubey, Jadhav e Zakirova (2012), como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação da energia gasta na produção primária e reciclada de módulos de c-Si

	Padrão	Reciclado
Entrada de energia	9,32 kWh/wafer ou 4,26 kWh/Wp	2,17 kWh/wafer ou 0,99 kWh/Wp
Payback de energia gasta na produção		
Regiões ensolaradas	2,58 anos	0,6 anos
Regiões continentais	4,92 anos	1,14 anos

Fonte: DUBEY *et al.* (2012).

Os metais preciosos como prata e cobre também merecem atenção. A obtenção da prata em especial, segundo diversos autores, deve ganhar o foco das próximas etapas de desenvolvimento da reciclagem fotovoltaica de c-Si, contribuindo para sua viabilização (DIAS, 2015; IRENA, 2016; WAMBACH, 2017; DENG *et al.*, 2019). De acordo com Dias (2015), a concentração média deste metal no minério vem diminuindo, enquanto a quantidade produzida anualmente foi mantida. O preço médio da prata subiu consideravelmente nas últimas décadas conforme mostra a Figura 6, contribuindo para aumentar o interesse na *reciclagem de alto valor*.

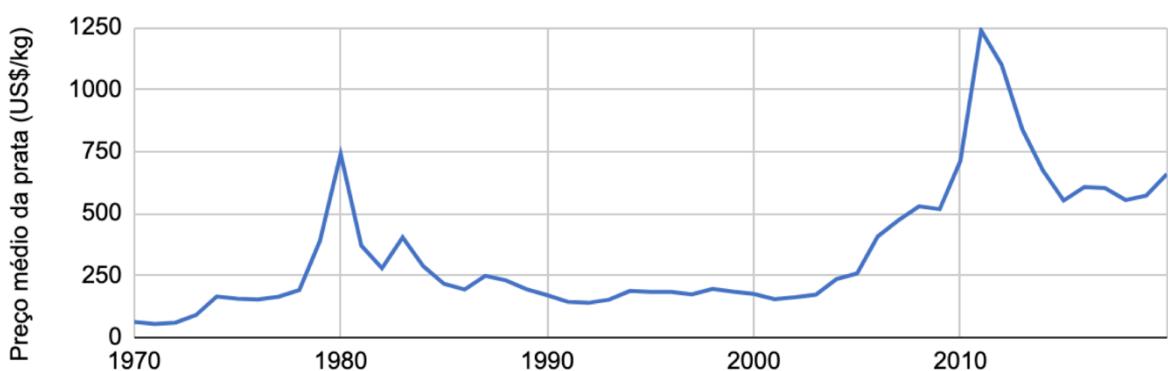


Figura 6 - Histórico de preços médios da prata (US\$/kg) de 1970 a 2020

Fonte: elaboração própria a partir de MACROTRENDS (2020).

É importante ressaltar que o atual fluxo de descarte fotovoltaico não é suficientemente alto, decorrendo que alguns projetos piloto já foram suspensos pela baixa demanda, como os das empresas Sasol S.r.l. e Deutsche Solar AG. Iniciativas

de pesquisa também reportaram a dificuldade de encontrar módulos descartados para realizar os estudos. Oliveira *et al.* (2017) estimaram que a partir de 2040 o número de placas descartadas no Brasil começa a crescer consideravelmente, no entanto antes deste período o fluxo deste resíduo se mantém relativamente baixo, como observado na Figura 7. Segundo este cálculo, até 2050 aproximadamente 24,5 milhões de módulos de c-Si terão sido descartados no Brasil, equivalendo a cerca de 455 mil toneladas (considerando 18,6 kg/módulo em média). Consoante a tal cômputo, o relatório *End of Life Management Solar PV Panels* da IRENA (2016) estima este montante entre 300 mil e 750 mil toneladas no mesmo período.

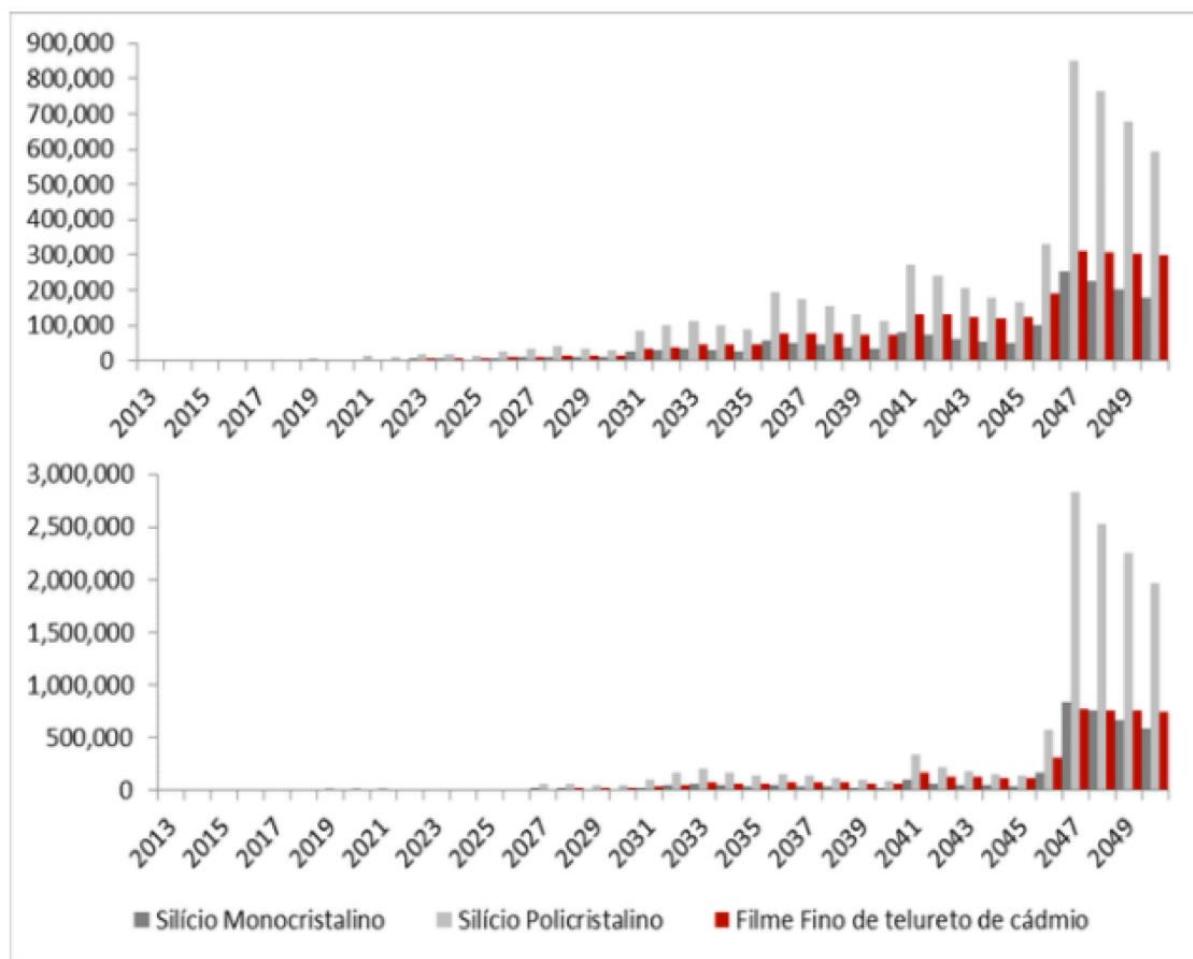


Figura 7 - Estimativa do descarte anual de placas fotovoltaicas para geração distribuída e centralizada, respectivamente

Fonte: OLIVEIRA, D. *et al.* (2017).

A literatura neste assunto apresenta diversos estudos de viabilidade econômica e relatórios anuais de organizações relacionadas à indústria de materiais e reciclagem costumam ser boas fontes de custos operacionais. D'Adamo, Miliacca e Rosa (2017) usaram a seguinte proporção aproximada de custos em sua análise de

uma planta de reciclagem (módulos de c-Si) de 2.000 toneladas por ano: coleta (34%), processamento (52%) e custos administrativos (14%), sem descrever a área coberta pela coleta. No estudo de Deng *et al.* (2019) os custos de coleta estão parametrizados por distância ou área, mas por tonelada de painéis coletados. A síntese destes parâmetros pode ser vista na Tabela 7, constando medianas adotadas, sem as margens de incerteza máxima e mínima.

Tabela 7 - Custos medianos de diferentes métodos de reciclagem por tonelada de painéis

Método	Componente de custo	Custo US\$/ t	Custo relativo
Reciclagem de vidro de <i>baixo valor</i>	Aterramento	Descarte em aterro	150
		Coleta de painéis	240
		Descarte de resíduo sólido perig.	27
		Depreciação	0
		Operação	168
		Manutenção e desp. adm.	0
Processo mecânico + químico simples de <i>alto valor</i>		Coleta de painéis	240
		Descarte em aterro	2,10
		Descarte de líquidos	13,16
		Descarte de cinzas	0,62
		Descarte de lodo	9
		Depreciação	279
Processo térmico + químico complexo de <i>alto valor</i>		Operação	373
		Manutenção e desp. adm.	37
		Coleta de painéis	240
		Descarte de líquidos em aterro	26,32
		Descarte de plástico perigoso	4,40
		Descarte de cinzas	1,34

Fonte: Deng *et al.* (2019).

É notável a grande influência dos custos logísticos e operacionais sobre o total. Por este motivo, muitos autores recomendam que se continue a investir em pesquisas para aprimorar os métodos e adequação dos processos pelo lado da engenharia industrial, além de elaboração de sistemas ou esquemas de coleta que aumentem a eficiência desta etapa. O processamento de placas de filme fino em uma mesma planta poderia aumentar a rentabilidade com a obtenção de metais como o

telúrio, índio, gálio e germânio. Além disso, enquanto o volume de descarte ainda não for atrativo (Fthenakis & Choi [2014] previram que apenas com uma capacidade de 19.000 toneladas anuais o negócio tornar-se-ia viável), é recomendado o armazenamento adequado para processamento futuro, ou a reciclagem simples de vidro que já ocorre em muitos casos. No Brasil, a reciclagem de vidro tem no custo logístico um fator que a inviabiliza em certas regiões, uma vez que os polos vidreiros, onde seriam reciclados ou utilizados o material reciclado, estão concentrados em São Paulo, Recife, Rio de Janeiro e Porto Alegre, mas o consumo se dá de forma esparsa (VIALLI, 2016).

Nas publicações de referência desta questão não é possível encontrar de forma quantitativa o potencial para criação de empregos, no entanto o relatório já citado da organização IRENA (2016) analisa o quadro qualitativamente. É esperado que tanto no setor público (como no governo, institutos públicos de pesquisa, agências reguladoras etc.) quanto no setor privado (fabricantes, empresas de gestão de resíduos, etc.) empregos sejam gerados. Toda uma indústria de serviços de reparo, reforma e reuso deverá ter lugar na cadeia solar fotovoltaica.

2.5. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E CICLO DE VIDA

Toda ação antrópica produz efeitos sobre o meio ambiente e tem potencial para desequilibrar os ecossistemas, porém com desenvolvimento de tecnologias e procedimentos mais elaborados é possível reduzir tais impactos. No mercado de energia solar, isto pode ser considerado tanto à etapa de produção quanto à de reciclagem dos módulos. Ou seja, se os benefícios da reciclagem superarem os impactos negativos da produção e da reciclagem somados, então a reciclagem é tida como vantajosa ambientalmente. Aspectos importantes a serem considerados em uma avaliação socioambiental a respeito deste assunto são a depleção de material bruto, aquecimento global, resíduos gerados, além de acidificação e eutrofização do meio (DUBEY *et al.*, 2012).

2.5.1. Resíduos tóxicos

Apesar de aparecerem em uma fração muito pequena, alguns materiais perigosos fazem parte da composição dos painéis fotovoltaicos. No caso da tecnologia de silício cristalino, estes costumam ser prata, chumbo e estanho, variando sua fração constituinte entre 0,03% e 0,23% (somados) em relação à massa total do módulo, a depender do *design* (DENG *et al.*, 2019). Tais compostos podem passar do material residual para o ambiente através da lixiviação.

Considerando os resíduos expostos a um pH baixo (como ácido nítrico ou chuva) a lixiviação pode provocar transferência de 13% a 90% do chumbo presente em uma célula solar média para o meio, equivalendo entre 75g a 518g médios por tonelada de painel de c-Si. Exposição ao chumbo pode causar danos aos sistemas nervoso, imunológico, reprodutor e cardiovascular, além do funcionamento renal. Em ecossistemas a presença abundante deste metal pode incorrer em baixo ritmo reprodutivo de plantas e animais, perda de biodiversidade e prejuízos neurológicos em vertebrados. O custo externalizado pelo tratamento médico decorrente desta exposição na Europa é estimado em €1,174 /g de chumbo liberado ao meio (MONIER & HESTIN, 2011). Vale lembrar que não só trabalhadores que manuseiam os resíduos se expõem a estes riscos, mas sim toda uma área populacional pode ser afetada caso estes contaminantes atinjam algum lençol freático. Outros modos de contaminação com tais substâncias são o contato pela pele e inalação (IRENA, 2016). Além dos constituintes do módulo em si, subprodutos dos processos químicos são potencialmente tóxicos quando não tratados e manipulados adequadamente, assim como fluoretos liberados no ar na queima de plásticos fluorados ao final dos processos térmicos. Foi verificado que a incineração seria a única opção viável para *backsheets* fluoradas seguido de tratamento dos gases e cinzas, uma vez que a pirólise libera ácido hidrofluorídrico (ARYAN *et al.* apud DENG *et al.*, 2019).

A quantidade de chumbo presente nos painéis vem diminuindo conforme fabricantes encontram materiais e formas construtivas alternativas. Ademais, módulos da 3^a geração são compostos por elementos menos problemáticos nestes aspectos (por exemplo os que utilizam células orgânicas) são previstos para assumir grande participação de mercado futuramente.

2.5.2. Depleção de recursos naturais

Alternativas para o final de vida dos painéis como aterramento e incineração podem ser atrativas pelo ponto de vista logístico, mas impossibilitam a reutilização do material usado. Alumínio e vidro compõem a maior parte da massa do módulo, podendo-se assumir tais índices de recuperação em 100% e 90-95%, respectivamente (MONIER & HESTIN, 2011). A obtenção destes materiais pela reciclagem já é praticada há anos e presumir a manutenção destes recursos na cadeia produtiva é seguro.

Trabalhos acadêmicos já indicaram a recuperação de até 95% da prata e cobre presentes no módulo (LATUNUSSA *et al.*, 2016) no projeto FRELP (ver seção 2.2.1). No entanto, não é uma rota de reciclagem largamente utilizada, sendo importante seu desenvolvimento técnico para viabilizá-la financeiramente. A produção de prata poderia cair futuramente, ou por outros motivos seu preço aumentar no mercado, portanto, a iniciativa que dominar esta extração estaria em grande vantagem competitiva.

É importante mencionar que enquanto um material é empregado em um painel fotovoltaico, ficará impossibilitado de ser usado em outras aplicações por 20 a 30 anos. A reciclagem permite a reentrada de destes materiais na indústria. A exemplo da prata, pelo menos 90 toneladas poderiam ser recuperadas por meio desta rota de reciclagem até 2030, o que equivale a 2,5% da produção mundial no ano de 2012 (DIAS, 2015; IRENA, 2016). No Brasil há produção do metal, mas é necessário importá-lo para atendimento da demanda interna (SOUZA *et al.*, 2013). Por este motivo, a recuperação deste elemento seria estratégica.

Estudos de impactos ambientais neste assunto também contabilizam na categoria de escassez de recursos naturais o uso de combustíveis fósseis, uma vez que estes são largamente utilizados na forma de energia térmica ou elétrica para a produção dos materiais brutos e transporte.

2.5.3. Potencial de aquecimento global

Como a produção de materiais tais quais vidro, alumínio e silício de grau solar exige grandes quantidades de energia, reaver tais componentes apresenta um bom potencial de economia energética e consequentemente de redução no aquecimento global. A manufatura dos módulos FV geralmente se encontra em países com alto consumo de carvão, gás natural ou derivados de petróleo, como visto na Figura 8. A geração de energia com estas fontes aumenta emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa, que a longo prazo podem aumentar a temperatura média da superfície terrestre. Entretanto, na etapa de logística reversa (ou seja, o transporte de módulos das instalações para centros de reciclagem) é gasto considerável montante de energia no transporte, sendo este o principal contribuinte de aquecimento global para as rotas da reciclagem (STOLZ, 2018).



Figura 8 - Maiores fabricantes de painel solar fotovoltaico no mundo

Fonte: ENERGY SAGE (2019).

Em um estudo que utiliza a metodologia ReCiPe (que através de 18 quesitos, summariza os impactos em 3 vertentes: saúde humana, ecossistemas e recursos naturais), Lunardi *et al.* (2018) demonstram dentro de certas premissas que a etapa de transporte pode duplicar ou até triplicar os impactos ambientais negativos da reciclagem, conforme aumenta a distância a ser percorrida. Ainda concluem que para as vertentes saúde humana e ecossistemas (ambos influenciados pelo potencial de aquecimento global na metodologia) uma planta de reciclagem deveria distar até no máximo 80km do ponto de coleta dos resíduos para ter menores impactos do que aterros e plantas de incineração – considerando um caminhão à diesel com capacidade entre 16 e 32 toneladas como meio de transporte. A sugestão fornecida

por este estudo é a construção de operações de reciclagem móveis ou plantas menores distribuídas. Apesar desta ressalva, os autores reforçam que em todos os outros aspectos as rotas de reciclagem são muito mais vantajosas do que aterramento e incineração.

2.5.4. Acidificação e eutrofização

Acidificação é o processo de diminuição do pH de um determinado meio, particularmente solo, ar e água quando no contexto de impactos ambientais. Este aumento da acidez pode prejudicar e desequilibrar fauna e flora em ecossistemas. Tal efeito é causado principalmente pelas etapas de processamento químico na reciclagem (lixiviação com ácido, eletrólise e neutralização) – utilizados na recuperação de metais – e transporte (LATUNUSSA *et al.*, 2016). Como a acidificação geralmente está relacionada à emissão de gases de combustão fóssil, a etapa de produção dos painéis tem participação muito mais significativa do que a de reciclagem.

Eutrofização é a deposição demasiada de nutrientes como fósforo e nitrogênio em algum sistema. A presença limitada destes nutrientes costuma regular a população de diversas espécies em um determinado equilíbrio, porém, a partir do momento em que há mais destes nutrientes disponível, a presença de certas espécies pode aumentar e até alterações fisiológicas podem aparecer. No mar, é comum que a eutrofização eleve a quantidade de algas próximas à superfície, resultando em uma série de efeitos em cascata que desequilibram o meio. Na produção e reciclagem de painéis fotovoltaicos também está associada às etapas onde há considerável consumo energético, seja por máquinas e processos, seja pelo transporte. Isto, porque a eutrofização é consequência da liberação de óxidos nitrosos (NO_x) no ar pela combustão.

3. ANÁLISE DOS FATORES ENVOLVIDOS NA RECICLAGEM FV

Como descrito no capítulo anterior, o problema da reciclagem fotovoltaica envolve múltiplos aspectos. Neste capítulo são analisados os aspectos tecnológico, econômico, logístico, legislativo e administrativo da reciclagem fotovoltaica com base na experiência internacional, porém com vistas a aportar uma contribuição da regulação das atividades de reciclagem de painéis solares na realidade brasileira.

3.1. DISCUSSÃO NO ÂMBITO TECNOLÓGICO E ECONÔMICO

A reciclagem do vidro e alumínio, os dois materiais com maior proporção na composição mássica, já é uma prática consolidada no país (sendo o Brasil um dos países que mais recicla alumínio) e, portanto, exequível do ponto de vista da tecnologia. De acordo com a Tabela 2, só com estes dois componentes, entre aproximadamente 75% e 90% de um módulo já poderia ser submetido à reciclagem com tecnologias correntes no Brasil e indústrias já estabelecidas, considerando que ambos os materiais possuem eficiência de reciclagem próximas a 100%. Conforme exposto nas seções 2.2 e 2.5, o *upcycling*, apesar de não estar maduro tecnicamente, deve ser a meta no desenvolvimento da reciclagem, principalmente pela questão de depleção de recursos (alguns materiais não podem mais ser obtidos após os processos mecânicos do *downcycling*) e pelo risco de contaminação do meio ambiente com elementos tóxicos. A *reciclagem de alto valor* já realizada no Brasil é promissora, pois conta com processos manuais, mecânicos, térmicos e químicos, levando a crer que os índices de obtenção da prata e remoção do chumbo podem ser altos. No entanto, a atividade é recente e poucos dados estão disponíveis para compreender se a atividade se sustentará no futuro e sua tecnologia se desenvolverá.

Até este amadurecimento chegar, é importante conter e mitigar os impactos, empregando os meios já disponíveis. Ou seja, o emprego do *upcycling* é prioritário, mas quando não for viável, é preferível usar as rotas de *downcycling* com aterramento da parte tóxica inaproveitável (em aterros de classe I), ou ainda o aterramento direto quando impossível a *reciclagem de baixo valor*. Desta forma, evitar-se-ia ao máximo que módulos terminassem em lixões e outros terrenos.

Um incentivo às rotas de *alto valor* seria o aproveitamento do silício em grau igual ou superior ao metalúrgico. Apesar das maiores jazidas de quartzo estarem situadas em solo brasileiro, não há plantas aqui que produzam comercialmente o silício em grau solar ou eletrônico (ambos com alto grau de pureza quando comparado ao silício metalúrgico). Valadares (2019) menciona um projeto da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em parceria com uma produtora de silício brasileira. O desenvolvimento da produção industrial de células solares por esta frente seria relevante, pois o silício obtido na rota de *alto valor* poderia se tornar matéria prima para obtenção de novas células.

A fabricação local de pastilhas de silício e células solares diminuiria consideravelmente o custo dos módulos fotovoltaicos e poderia aumentar a receita na *reciclagem de alto valor*. No entanto, a obtenção das células solares pelo *upcycling* é potencialmente atrativa do ponto de vista econômico, mesmo sem a fabricação local deste componente do painel. A depender da pureza das pastilhas obtidas, estas poderiam ser reprocessadas, recebendo nova dopagem, filamentos metálicos e camadas antirreflexo, prontas para serem utilizadas em novos painéis. No pior dos casos, poderia ser utilizada como matéria prima de novas pastilhas, onde demandaria menores custos por já estar em uma forma próxima da final.

Outro fator importante na viabilização econômica da reciclagem é o tamanho das instalações fotovoltaicas. Instalações do porte de minigeração (de 75 kW a 5 MW) e geração centralizada (acima de 5 MW) costumam conter razoável quantidade de materiais ferrosos (como estruturas de suporte), cobre e equipamentos eletrônicos (tais quais inversores, microinversores e *trackers*, por exemplo), agregando maior valor à reciclagem da instalação. Além disso, o fato de toda esta massa de recicláveis estar concentrada numa mesma região é favorável para diminuir os custos logísticos.

3.2. LOGÍSTICA DA COLETA E RECICLAGEM

O Brasil, por sua grande extensão territorial, naturalmente apresenta desafios logísticos em diversas atividades econômicas. A própria reciclagem de vidro, como mencionado na seção 2.4, fica mais restrita às regiões produtoras e transformadoras do material. No entanto, ao se considerar a distribuição do potencial

solar no Brasil enxerga-se que este é mais denso na faixa litorânea. A região Norte, por exemplo, não possui tantas instalações e consequentemente não apresentará tantos módulos FV quanto o Nordeste ou Sudeste para disposição final no futuro.

Para compreender melhor quais são as regiões com maior número de painéis instalados, foram averiguados bancos de dados disponibilizados pela ANEEL para instalações fotovoltaicas de geração distribuída (GD) e centralizada (GC). Dentre as diversas informações presentes nestes bancos de dados, para cada instalação registrada pela agência constam a potência, ano de instalação, município e unidade federal. Desta forma, ao cruzar a informação das potências com coordenadas de latitude e longitude dos municípios fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foi possível traçar um mapa de calor com uma ferramenta geoanalítica, o website Heatmapper. Para cada coordenada atribui-se um peso (no caso, a potência instalada), e no mapa resultante é possível observar zonas “quentes”, ou seja, onde a densidade de potência instalada é maior. A limitação da ferramenta utilizada é a impossibilidade de fixar uma escala com valores atrelados às cores das zonas, ou seja, para cada mapa traçado, as cores representam densidades diferentes. A análise foi segmentada plotando quatro mapas, sendo: (i) um para GD, no período 2008-2016; (ii) outro para GD no período 2016-2020; (iii) um terceiro para GC no período 2016-2020; e finalmente (iv) um para GD e GC somados no período 2008-2020.

Tais mapas são exibidos na Figura 9, onde as zonas em vermelho representam alta densidade de potência fotovoltaica instalada, que gradativamente até o amarelo representam zonas com densidades menores. Os pontos azuis são localidades mais isoladas, que considerando os valores próximos não chegam a formar zonas. Apreende-se pela imagem que as seguintes regiões contam com grandes quantidades de painéis de geração centralizada: Montes Claros (MG), Serra Dourada (BA), São Gonçalo do Gurguéia e Pedro Laurentino (PI). As regiões de Mossoró (RN), Fernandópolis e Getulina (SP) também se sobressaem, mas representando menores potências. Já na geração distribuída é possível observar muitos pontos pulverizados por diversas regiões, mas ficam destacadas regiões como Porto Alegre (RS), Campinas (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Belo Horizonte (MG). Ao ressaltar tais localidades, identifica-se que um centro de reciclagem especializada em

Minas Gerais ou Bahia seria interessante pela curta distância às grandes usinas concentradas na região. Centros de armazenamento de painéis no interior do estado de São Paulo, próximo a Porto Alegre e na região de Mossoró ou Fortaleza também seriam boas localidades, possibilitando a coleta de uma grande área e viabilizando a remessa para os centros de reciclagem quando grandes quantidades fossem acumuladas. Vale mencionar que muitas destas localidades estão relativamente próximas aos polos vidreiros mencionados em 2.4, o que significa que a reciclagem

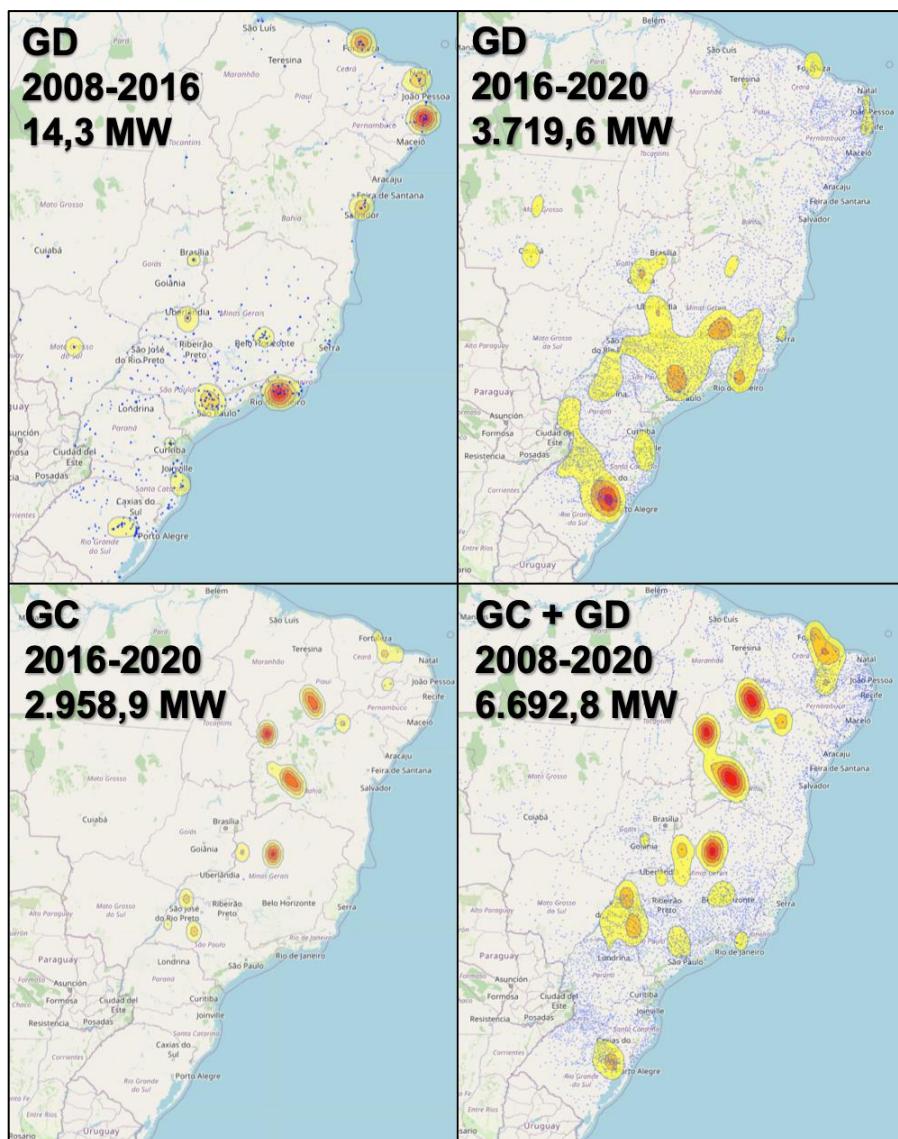


Figura 9 - Comparação de potência fotovoltaica total instalada no Brasil entre geração distribuída e centralizada

Fonte: elaboração própria a partir de ANEEL (2020a), ANEEL (2020b) e IBGE (2019).

do vidro em muitos casos não contaria com grande impeditivo logístico.

Ao analisar as condições das rodovias no eixo que liga zonas de alta densidade de potência (São Paulo, Belo Horizonte, Montes Claros, Serra Dourada,

São Gonçalo do Gurguéia e Pedro Laurentino) constatam-se as condições das vias presentes na Tabela 8. Apenas as rodovias MG-401 e PI-141 apresentaram más condições de conservação (no entanto, algumas outras vias constantes no eixo não foram avaliadas pela fonte). Caso muitos quilômetros de estradas eventualmente necessitarem de benfeitorias públicas, a viabilização logística da reciclagem será mais difícil e demorada. No entanto, muitas vezes os próprios empreendimentos solares atuam na abertura e melhoria de vias.

Tabela 8 - Estado geral de rodovias de acesso a regiões com grandes empreendimentos FV

Código	Estado Geral
BR-381	Bom
BR-135	Bom
BR-251	Regular
BR-122	Regular
MG-401	Ruim
BR-242	Bom
BR-235	Bom
BR-324	Bom
PI-141	Péssimo

Fonte: CNT (2019).

3.3. QUADRO REGULATÓRIO DO DESCARTE FOTOVOLTAICO

Entende-se que para haver uma mobilização do Poder Legislativo em direção à solução deste problema é necessária a conscientização popular – realizada através de reportagens, relatórios de organizações relevantes, trabalhos acadêmicos, etc. – e atuação de entidades intermediárias entre este poder e a população, como vereadores, associações de setor, organizações não governamentais (ONGs), entre outras. Ao perceber que a pauta de reciclagem fotovoltaica é importante para a população, vereadores, deputados e senadores podem trabalhar na adequação de leis existentes e elaboração de leis novas.

O primeiro ponto que surge neste âmbito é a necessidade de eliminar quaisquer dúvidas e ambiguidades quanto à classificação dos resíduos de módulos FV. Atualmente podem ser enquadrados como REEE, mas este debate ainda não é comum, o que dificulta a determinação da rota de descarte para os mesmos. Outra opção seria sua inclusão na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos com identificação

distinta à dos eletroeletrônicos (que na lista recebem o código 20 01 35). O ônus desta tratativa é o esforço e morosidade para elaborar legislação específica, porém a vantagem é evitar distorções na interpretação jurídica e endereçar uma rota de tratamento mais adequada a este resíduo, que como mencionado previamente, não deve ser exatamente a mesma dos eletroeletrônicos.

Uma eventual lei específica sendo federal, evitaria a transferência de resíduos FV entre estados, como ocorre no caso dos EUA, conforme exposto na seção 2.3.2. Percentuais de reciclagem da massa de módulos descartada poderiam ser adotados para períodos consecutivos aumentando gradativamente a cada período, permitindo que todo o setor se ajustasse, a exemplo do que foi adotado na União Europeia, de acordo com o Quadro 1. No entanto, os índices devem ser adequados à realidade da reciclagem brasileira, de forma que não prejudique o mercado solar fotovoltaico no país. Requerer taxas inalcançáveis de recuperação e reciclagem atreladas a penalizações aos agentes da cadeia fotovoltaica poderia minar o desenvolvimento do mercado. No mister de conscientização a lei poderia exigir que fabricantes e importadores apresentem material informativo em seus canais de distribuição, na forma textual ou audiovisual, disponibilizado *online* ou entregue no ato da compra, junto a manuais de usuário e outros documentos.

Atualmente para painéis FV serem comercializados, devem ser testados e caso aprovados, recebem um rótulo do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Os testes realizados constam na Portaria nº 004/2011 do instituto e são de natureza elétrica e mecânica, comprovando níveis adequados de qualidade e segurança do produto. No entanto, os módulos não recebem rotulagem específica quanto à sua toxicidade. Sabendo que chumbo e prata são componentes padrão da tecnologia de silício cristalino, e outras substâncias tóxicas também compõem os módulos de filme fino, uma rotulagem quanto à periculosidade do produto e de precauções no manuseio poderiam evitar o descarte inapropriado em lixões e aterros de classe II. Os níveis de cada substância podem variar de um modelo para o outro, desta forma, para realizar esta rotulagem torna-se necessário a realização de testes conforme descrito na norma NBR 10005/2004 (Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos), e caso excedam os limites constantes na norma NBR 10004/2004 – Anexo F, o rótulo deveria

alertar para a periculosidade. Uma outra etiqueta facultativa poderia ser encorajada para produtos que comprovadamente tivessem um projeto construtivo concebido para o retorno das matérias primas ao ciclo produtivo – o denominado *eodesign* – ou para módulos que utilizassem matéria prima reciclada. Desta forma, consumidores conscientes poderiam escolher mais facilmente os modelos menos prejudiciais ao meio ambiente.

3.4. CONSIDERAÇÕES ADMINISTRATIVAS

Tendo em vista que fabricantes, importadores, comerciantes, integradores e agentes da manutenção não têm seu foco na administração de um esquema de reciclagem, a criação de uma ou mais entidades administradoras sem fins lucrativos financiada por todos estes participantes seria vantajosa por compartilhar custos e responsabilidades. Tais entidades poderiam atuar na gestão logística (coordenando coletas e rotas), operacional (mantendo centros de armazenamento de painéis em localidades intermediárias a grandes centros), financeiro e contratual. O monitoramento de quantidades recicladas realizado por tais entidades poderia ser reportado periodicamente ao IBAMA, ICMBio, o próprio Ministério do Meio Ambiente (MMA) ou órgãos estaduais cuja competência seria de fiscalização em assuntos ambientais, para verificação do atingimento de metas de reciclagem. Neste modelo, a administradora teria uma receita proveniente da venda de material para empresas recicadoras, que seria utilizada para cobrir parte dos custos. O faltante seria rateado entre os participantes, de forma proporcional e justa que não onerasse demasiadamente membros mais vulneráveis.

3.5. SUGESTÕES DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Ao levar em consideração todos os aspectos mencionados ao longo deste capítulo, é possível concluir que medidas devem ser tomadas em diversas frentes de forma integrada. Enquanto o debate entre a população e sua conscientização devem se aprofundar, é recomendável que sejam realizados investimentos em P&D e que os agentes envolvidos na cadeia fotovoltaica se mobilizem conjuntamente. As sugestões de políticas públicas direcionadas para a resolução deste problema são:

- (i) Investimento em pesquisa de processos de reciclagem e aplicação destes em escala industrial;
- (ii) Investimento em pesquisa para produção do silício de grau solar no Brasil e desenvolvimento deste mercado;
- (iii) Emprego das rotas de reciclagem já disponíveis no Brasil nos casos em que a *reciclagem de alto valor* não for viável, até que esta amadureça e esteja mais amplamente disponível e acessível;
- (iv) Elaboração de esquemas logísticos para cobrir prioritariamente as regiões onde mais se instalam painéis fotovoltaicos, com diferenciação entre o atendimento à geração centralizada e à distribuída;
- (v) Promoção deste debate entre a sociedade, o Poder Legislativo e o Executivo;
- (vi) Inclusão futura deste resíduo na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos para melhor disposição final possível;
- (vii) Elaboração de lei específica com metas de índices de reciclagem a serem alcançados, aumentando gradativamente os índices a cada período sucessivo;
- (viii) Previsão em lei de entrega de material informativo quanto ao descarte adequado das placas por parte de comercializadores em seus canais de distribuição para todos os compradores;
- (ix) A obrigatoriedade de testes de periculosidade dos materiais contidos nos módulos e rotulagem de produtos considerados perigosos. Com o mesmo fim, os fabricantes deveriam ter a obrigação de prestar informações quanto à composição material para as empresas de reciclagem que solicitasse;
- (x) Elaboração de um programa de etiquetagem para módulos que foram concebidos pensando em seu ciclo de vida, favorecendo esta escolha pelos consumidores conscientes; e
- (xi) Organização dos agentes do mercado como fabricantes, importadores, distribuidores, comercializadores, integradores, instaladores e outros através da criação de entidades administradoras para centralizar e facilitar determinadas atividades envolvidas no processo de reciclagem.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho visou analisar o problema da reciclagem fotovoltaica no Brasil. Buscou-se o entendimento amplo deste problema por meio de um estudo que considerou a experiência nacional e internacional nos aspectos técnicos, regulatórios, econômicos e socioambientais relativos à reciclagem dos painéis. Posteriormente, através de uma análise de tais aspectos sob a ótica da realidade brasileira, procurou-se responder o questionamento central, ou seja, de que maneira o Brasil deve se preparar para a gestão de resíduos fotovoltaicos.

Primeiramente foram apresentados os tipos de painel solar fotovoltaico existentes, seus componentes materiais e participação no mercado de cada um. Ao identificar a predominância da utilização de painéis de silício cristalino no Brasil e no mundo, o foco nesta tecnologia foi estabelecido para esta monografia e, então, foram explanados os métodos e processos de reciclagem. Os métodos térmico e químico foram identificados como promissores, uma vez que permitem a obtenção de um produto final com maior valor agregado. Em seguida foram analisadas as legislações relativas a algumas regiões do globo, inclusive no Brasil, ressaltando a importância da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no problema da reciclagem como um todo e neste caso específico. Dessa análise destacou-se que a União Europeia conta com o quadro regulatório mais avançado na reciclagem FV, pois sua política aborda a responsabilidade dos *stakeholders*, metas de coleta e reciclagem, requerimentos para o tratamento e conscientização de consumidores.

Também mereceram atenção os aspectos que influenciam a economia da atividade de reciclagem, como variáveis de maior custo ou com possibilidade de serem geradoras de receita. Ao fim da revisão bibliográfica ficaram claras as consequências ambientais do descarte indevido e outros fatores envolvidos na produção, uso e disposição dos módulos fotovoltaicos. Desta análise foi possível concluir que a reciclagem, já presente no Brasil, de vidro e alumínio, elementos que compõem os painéis, poderá ser fundamental para a correta destinação do grande volume de painéis a serem descartados no futuro, especialmente na transição da *reciclagem de baixo valor para alto valor*, evitando grande quantidade de painéis com descarte inadequado.

A esse respeito, observou-se, no entanto, que se faz necessário investir em pesquisa para aprimorar tecnologicamente estas rotas de reciclagem mais avançadas, em território nacional, sendo relevante, inclusive, o desenvolvimento da produção interna de *wafers* e células solares para reintrodução, através de reciclagem, do silício de grau solar no mercado brasileiro.

Considerando-se as localidades com maior número de painéis instalados no Brasil, segundo dados da ANEEL (2020), foi possível depreender que nas próximas décadas, os maiores volumes de descarte fotovoltaico estarão em localidades do Nordeste, além do norte de Minas Gerais e interior de São Paulo. Como consequência, merece destaque o fato de que boa parte das rodovias que interligam estas localidades têm condições minimamente aceitáveis, viabilizando uma regulação que venha a exigir o descarte apropriado.

Quanto ao aspecto legislativo, os resultados da análise indicam que os painéis fora de serviço atualmente já deveriam contar com uma rota de disposição elaborada pelos fabricantes e importadores, de acordo com o conceito de responsabilidade estendida previsto na PNRS. No entanto, chama-se aqui a atenção para o fato de que se faz necessária a mobilização de toda a sociedade quanto a este tema para que ele se torne pauta dos legisladores e tomadores de decisão. Ademais, uma abordagem aos aspectos específicos da reciclagem fotovoltaica deveria ser incluída na referida Política com vistas a minimizar impactos ambientais e maximizar o valor de materiais reintroduzidos no ciclo produtivo.

Também foi verificado o possível benefício de prever em lei uma etiquetagem a respeito da periculosidade dos painéis comercializados no Brasil. Este tipo de sinalização poderia alertar o consumidor ou manuseador quanto aos perigo do descarte indevido, aumentando as chances de que ocorresse a destinação final adequada. E, por fim, foram identificados os órgãos que teriam função de fiscalizar, além de avaliar as vantagens da criação de uma ou mais entidades com a responsabilidade exclusiva de administrar a reciclagem, centralizando informações e as reportando aos órgãos governamentais.

As conclusões levaram a uma série de proposições de políticas públicas para que o Brasil se prepare para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos. Dentre as principais delas estão:

- (i) Investimento em pesquisa de processos de reciclagem e aplicação destes processos em escala industrial;
- (ii) Emprego das rotas de reciclagem já disponíveis no Brasil nos casos em que a *reciclagem de alto valor* não for viável, até que esta amadureça e esteja mais amplamente disponível e acessível;
- (iii) Elaboração de esquemas logísticos para cobrir prioritariamente as regiões que mais concentram instalações de painéis fotovoltaicos, com diferenciação entre o atendimento à geração centralizada e à distribuída;
- (iv) Inclusão futura dos resíduos derivados de painéis fotovoltaicos na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos para melhor disposição final;
- (v) Elaboração de lei específica com metas de índices de reciclagem a serem cumpridos, aumentando gradativamente estes índices nos períodos seguintes;
- (vi) Obrigatoriedade de testes de periculosidade dos materiais contidos nos módulos e rotulagem de produtos considerados perigosos. Com o mesmo fim, obrigatoriedade de prestação de informações quanto à composição material para as empresas de reciclagem que solicitasse;
- (vii) Organização dos agentes do mercado — tais como fabricantes, importadores, distribuidores, comercializadores, integradores, instaladores e outros — através da criação de entidades administradoras para centralizar e facilitar determinadas atividades envolvidas no processo de reciclagem.

As principais limitações deste trabalho devem-se à indisponibilidade de informações técnicas e financeiras de forma centralizada sobre a destinação e reciclagem dos painéis no Brasil, além da inexistência de dados mais atuais a respeito da reciclagem de outros materiais relacionados a este segmento. Para contornar esta restrição, informações foram obtidas em entrevistas e dados financeiros disponíveis em estudos de outros países foram considerados, complementados por uma análise que considerou as peculiaridades do cenário brasileiro.

Assim, para complementar e aprofundar o entendimento da questão foram sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros: (i) inventário e avaliação de ciclo de vida da reciclagem de vidro e alumínio praticada no Brasil, aplicados à reciclagem

fotovoltaica; (ii) análise de viabilidade técnico-econômica de uma planta de *reciclagem de alto valor* de resíduos fotovoltaicos no Brasil; (iii) análise da viabilidade econômica do armazenamento e transporte seguro de módulos FV para reciclagem; e (iv) análise dos impactos ambientais decorrentes do descarte indevido em regiões com grande quantidade de instalações solares fotovoltaicas.

Por fim, destaca-se que a principal contribuição desta monografia foi analisar as variáveis técnico-econômicas mais relevantes no problema da reciclagem de painéis fotovoltaicos, demonstrar em quais áreas geográficas é necessário direcionar o foco de ação e oferecer proposições que poderão servir de ponto de partida pra uma gestão de resíduos fotovoltaicos capaz de lidar com os grandes volumes de descartes previstos para as próximas décadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos:** Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. 2013. Disponível em: http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1416934886.pdf. Acesso em: 26 ago. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Brasil alcança 170 mil megawatts de capacidade instalada em 2019.** 10 jan. 2020. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false#:~:text=A%20atua%C3%A7%C3%A3o%20da%20Ag%C3%A3ncia%20Nacional,a%20meta%20de%205.781%20MW. Acesso em: 6 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Geração Distribuída: Unidades consumidoras com geração distribuída com Tipo de Geração UFV.** Junho, 2020b. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_fonte_detalhe.asp?Tipo=12. Acesso em: 24 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).** 2020a. Disponível em: <https://bit.ly/2H4ypNT>. Acesso em: 24 out. 2020.

ARAUJO, E. **Materiais fotovoltaicos começam a ser reciclados no Brasil.** Canal Solar, 6 mar. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/noticias/item/315-mateiras-fotovoltaicos-comecam-a-ser-reciclados-no-brasil>. Acesso em: 14 set. 2020.

BANDYK, M. **New California regulation could jump-start solar panel recycling sector.** Waste Dive, 15 jul. 2020. Disponível em: <https://www.wastedive.com/news/california-solar-panel-recycling-landfill/581330/>. Acesso em: 16 set. 2020.

BORLACE, D.1 Vídeo (15 min). **Preovskite Solar Cells: Game Changer?** Publicado pelo canal Just Have a Think. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TkFf8kRwOo8&pp=qAMBugMGCgJwdBAB>. Acesso em: 31 ago. 2020.

BORN, M.; WAMBACH, K. **Pyrolysis of EVA and its application in recycling of photovoltaics.** Journal of Environmental Sciences, Vol 16, 6, 889-893, 2004.

CANAL ENERGIA. **AES Tietê inicia piloto para reciclar uso de placas solares.** Canal Energia, 5 mar. 2020. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53128549/aes-tiete-inicia-piloto-para-reciclar-uso-de-placas-solares>. Acesso em: 21 set. 2020.

CHOWDHURY, S. et al. **An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.** Energy Strategy Reviews, v. 27, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301245>. Acesso em: 5 out. 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Painel de Consulta Dinâmica aos Resultados da Pesquisa CNT de Rodovias.** 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/painel>. Acesso em: 26 out. 2020.

CONIBEER, G. **Third generation photovoltaics**, 20 ago 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/12.828028>. Acesso em: 2 set. 2020.

D'ADAMO, I.; MILIACCA, M.; ROSA, P. **Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules.** International Journal of Photoenergy, v. 2017, p. 1-6, 27 jun. 2017. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2017/4184676/>. Acesso em: 25 set. 2020.

DENG, R. et al. **A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 109, p. 532-550, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302321>. Acesso em: 21 ago. 2020.

DIAS, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127924/000973954.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2020.

DUBEY, S.; JADHAV, N. Y.; ZAKIROVA, B. **Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies.** Energy Procedia, v. 33, p. 322-334, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301245>. Acesso em: 5 out. 2020.

ENERGY SAGE. **Where are solar panels made and should you care?** 2 jan. 2019. Disponível em: <https://news.energysage.com/where-solar-panels-are-manufactured/>. Acesso em: 2 out. 2020.

ENF SOLAR. **Solar Recycling Companies.** 2020. Disponível em: <https://www.enfsolar.com/directory/service/manufacturers-recycling>. Acesso em: 11 set. 2020.

ESTADO DE NOVA YORK. Lei do Senado nº S2837B, de 17 de janeiro de 2017. Um ato para emendar a lei de conservação ambiental, em relação à promulgação do "Ato de coleta de painel solar". **Solar panel collection act.** p. 1-5, 17 jan. 2017. Disponível em: <https://legislation.nysenate.gov/pdf/bills/2017/S2837B>. Acesso em: 17 set. 2020.

FEDKIN, M.; DUTTON, J. A. **Types of PV technology and recent innovations.** , 2013. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/608>. Acesso em: 2 set. 2020.

FILATOFF, N. **Australia's first solar-panel recycler plans to help green the full life cycle of components.** PV Magazine, 18 jan. 2019. Disponível em: <https://www.pv-magazine-australia.com/2019/01/18/australias-first-solar-panel-recycler-plans-to-help-green-the-full-life-cycle-of-components/>. Acesso em: 17 set. 2020.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics Report.** 23 jun. 2020. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2020.

FTHENAKIS, V.; CHOI, J. K. **Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives.** Journal of Cleaner Production, v. 66, p. 443-449, 1 mar. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652613007865>. Acesso em: 25 set. 2020.

FULL RECOVERY END OF LIFE PHOTOVOLTAIC. FRELP. **Technical Progress.** 8 out. 2015. Disponível em: [https://frelp.info/category/news/technical-progress/](https://freelp.info/category/news/technical-progress/). Acesso em: 14 set. 2020.

GHIZONI, J. P. **Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/176163/TCC%20-20JoanaPauliGhizoni.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 ago. 2020.

GREENER. **Dashboard Módulos - BI de Importação.** 2020a. Disponível em: <https://www.greener.com.br/dashboardimportacao-modulos/>. Acesso em: 2 set. 2020.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída: Mercado Fotovoltaico.** , 2020b. Disponível em: <https://www.greener.com.br/pesquisas-de-mercado/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1-semestre-de-2020/>. Acesso em: 2 set. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Malha geométrica dos municípios brasileiros.** 2019. Disponível em: <https://dados.gov.br/dataset/malha-geometrica-dos-municios-brasileiros>. Acesso em: 25 out. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. IRENA. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels.** 2016. Disponível em: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_ieapvps_end-of-life_solar_pv_panels_2016.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

KANZEN, G. **O mapa da mina da geração fotovoltaica centralizada.** Blog Cosol, 24 jun. 2016. Disponível em: <https://blog.cosol.com.br/blog/o-mapa-da-mina-da-gerao-fotovoltaica-centralizada>. Acesso em: 28 set. 2020.

LATUNUSSA, C. E. L. et al. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 156, p. 101-111, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816001227>. Acesso em: 5 out. 2020.

LUNARDI, M. M. et al. **Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules.** MDPI Applied Sciences, p. 1, 18 ago. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1396>. Acesso em: 21 ago. 2020.

MACROTRENDS. **Silver Prices - 100 Year Historical Chart.** 2020. Disponível em: <https://www.macrotrends.net/1470/historical-silver-prices-100-year-chart>. Acesso em: 22 set. 2020.

MONIER, V.; HESTIN, M. **Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive.** Bio Intelligence Service. p. 1-86, 14 abr. 2011. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>. Acesso em: 5 out. 2020.

NORTHWEST PRODUCT STEWARDSHIP COUNCIL. NPSC. First-in-the-nation legislation requiring manufacturers to recycle used solar units signed into law. **Northwest Product Stewardship Council**, Olympia, Washington, p. 1, 18 jul. 2017. Disponível em: <http://productstewardship.net/sites/default/files/Docs/about/solar-bill-press-release-2017-07-18.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2020.

OLIVEIRA, D. B.; LEBENSOLD, F.; OLIVEIRA, L. T. **Destinação final das placas fotovoltaicas pós consumo no brasil.** 2017. 100 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=23889. Acesso em: 5 out. 2020.

PHILIPPE, S.; FRISCHKNECHT, R. **Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling.** Task 12, p. 37, 5 out. 2017. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf. Acesso em: 5 out. 2020.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar.** 2020. Disponível em: [https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html#:~:text=Veja%20abaixo%20quais%20s%C3%A3o%20os,a%20fabrica%C3%A7%C3%A3o%20do%20painel%20solar\)&text=6%20Molduras%20do%20Painel%20Solar,Anodizado%20\(Frame%20do%20Painel%20Solar\)](https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html#:~:text=Veja%20abaixo%20quais%20s%C3%A3o%20os,a%20fabrica%C3%A7%C3%A3o%20do%20painel%20solar)&text=6%20Molduras%20do%20Painel%20Solar,Anodizado%20(Frame%20do%20Painel%20Solar)). Acesso em: 1 set. 2020.

PRADO, P. F. A. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30012019-141410/publico/PedroForastieri de Almeida Prado Corr18.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2020.

PV CYCLE. **Annual Report 2017.** 2017. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2018/07/2017-Annual-Report-PV-CYCLE-AISBL.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020.

PV CYCLE. **Annual Report 2018.** 2018. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2019/08/PV-CYCLE-AISBL-REPORT-2018-V2.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020.

PV CYCLE. **Annual Report 2019.** 2019. Disponível em: <http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2020/07/PV-CYCLE-AISBL-REPORT-2019-horiz.pdf>?fbclid=IwAR09v7fckTB9MnL1ocwCPDJtxcOSRmGpHrrfFHakoYWKM4rb7Ba4q3V-pl. Acesso em: 14 set. 2020.

RADZIEMSKA, E. K.; OSTROWSKI, P. **Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules.**, 1 dez. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ewa_Klugmann-Radziemska/publication/245190271_Chemical_treatment_of_crystalline_silicon_solar_cells_as_a_method_of_recovering_pure_silicon_from_photovoltaic_modules/links/568a79ca08ae051f9afa51af.pdf. Acesso em: 8 set. 2020.

RECLAIM PV RECYCLING. **Homepage.** 2020. Disponível em: <https://reclaimpv.com/>. Acesso em: 17 set. 2020.

RECYCLE PV SOLAR. **Homepage.** 2020. Disponível em: <https://recyclepv.solar/>. Acesso em: 14 set. 2020.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. REN21. 2020. **Renewables 2020 Global Status Report.** 2020, p. 1-367. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf. Acesso em: 31 out 2020.

REVKIN, A. **Climate Change First Became News 30 Years Ago. Why Haven't We Fixed It?**. 2018. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2018/07/embark-essay-climate-change-pollution-revkin/#:~:text=The%20crystallizing%20moment%20came%20on,is%20changing%20our%20climate%20now.%E2%80%9D>. Acesso em: 26 ago. 2020.

SHAIBANI, M. Solar panel recycling: **Turning ticking time bombs into opportunities.** PV Magazine, 27 maio 2020. Disponível em: <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/05/27/solar-panel-recycling-turning-ticking-time-bombs-into-opportunities/>. Acesso em: 17 set. 2020.

SOLATIO ENERGIA. **Plano de Controle Ambiental:** Usina Solar Pirapora 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. 2016. Disponível em: <https://www.idbinvest.org/es/download/3952>. Acesso em: 21 set. 2020.

SOUZA, G. D., et al. **Prata: Breve histórico, propriedades e aplicações.** Educ. quim. v. 24, p. 14-16, 2016. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000100003#:~:text=Por%20serem%20facilmente%20incorporadas%20em,purificadores%20de%20ar%C2%80%C2%80em%C2%80%C2%80instrumentos. Acesso em: 5 out. 2020.

SURESH, S.; SIGHVI, S.; RUSTAGI, V. **Managing India's PV Module Waste.** 2019. Disponível em: <https://bridgetoindia.com/backend/wp-content/uploads/2019/04/BRIDGE-TO-INDIA-Managing-Indias-Solar-PV-Waste-1.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020.

SUSTAINABILITY VICTORIA. **National approach to manage solar panel, inverter and battery lifecycles.** 2020. Disponível em: <https://www.sustainability.vic.gov.au/About-us/Research/Solar-energy-system-lifecycles>. Acesso em: 17 set. 2020.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. TCU. **Brasil tem quase 3 mil lixões em 1.600 cidades, diz relatório.** TCU Sustentável, 21 set. 2018. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A81881F6621B535016630E3A8E85773#:~:text=O%20Brasil%20tem%20quase%203,Pol%C3%ADtica%20Nacional%20dos%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos>. Acesso em: 21 set. 2020.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS USA. UCSUSA. **A Short History of Energy.** 15 jul. 2006. Disponível em: <https://www.ucsusa.org/resources/short-history-energy>. Acesso em: 26 ago. 2020.

VALADARES, P. **A energia solar e os desafios para sua consolidação no Brasil e no mundo.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28488/1/EnergiaSolarDesafios.pdf>. Acesso em: 5 out. 2020.

VIALLI, A. **Com produção concentrada, custo logístico dificulta a reciclagem do vidro.** Folha de São Paulo, 23 jun. 2016. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/seminariosfolha/2016/06/1784354-com-producao-concentrada-custo-logistico-dificulta-a-reciclagem-do-vidro.shtml>. Acesso em: 18 out. 2020.

WAMBACH, K. **Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe.** 24 jan. 2018. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1561522-life-cycle-inventory-current-photovoltaic-module-recycling-processes-europe>. Acesso em: 3 set. 2020.

XU, Y. et al. **Global status of recycling waste solar panels: A review.** Waste Management: International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, v. 75, p. 450-458, 2018. Disponível em: <https://dl.uswr.ac.ir/bitstream/Hannan/94906/1/2018%20WM%20Volume%2075%20May%202818%29.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2020.