

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIELA NEGRI FINGER

**IMPACTOS AMBIENTAIS E POSSIBILIDADES DE RECICLAGEM DOS
RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

DANIELA NEGRI FINGER

**IMPACTOS AMBIENTAIS E POSSIBILIDADES DE RECICLAGEM
DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Belançon

PATO BRANCO

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**IMPACTOS AMBIENTAIS E POSSIBILIDADES DE RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**”, da aluna “**DANIELA NEGRI FINGER**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 242 de 2019.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto

Prof. Dr. Marcos Paulo Belançon

Prof^a. Dr^a. Elizângela Marcelo Siliprandi

Prof. Me. Heitor José Tessaro

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus familiares e ao meu namorado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pois sem ele nada seria possível.

Aos meus pais, Rolin e Marisete Finger, por todo seu esforço, amor, dedicação e apoio durante toda a minha vida.

Ao meu irmão Raul Finger, que sempre me incentivou a nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu namorado Rafael Ely, por seu carinho e suporte nos momentos mais difíceis.

Aos meus orientadores Fernando Schenatto e Marcos Belançon, por me auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho. Também a UTFPR, instituição na qual não obtive apenas conhecimentos técnicos, mas também aprendi valores que me tornaram uma pessoa melhor.

E por fim agradeço imensamente aos meus amigos, que estiveram comigo em todos os desafios da graduação. Graças ao nosso companheirismo e trabalho em equipe pudemos alcançar nossos objetivos.

EPÍGRAFE

O que eu faço, é uma gota no meio de um oceano. Mas sem ela, o oceano será menor.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

FINGER, Daniela Negri. **Impactos Ambientais e Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Painéis Fotovoltaicos**. 2019. Monografia. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

A geração de energia elétrica a partir de painéis solares fotovoltaicos tem apresentado um crescimento exponencial no mundo todo. Devido sua longa vida útil média, o volume de resíduos de células fotovoltaicas deverá crescer rapidamente nos anos subsequentes. Embora essa tecnologia não gere emissões durante sua utilização, para ser considerada como limpa, todo seu ciclo de vida deve ser levado em consideração, inclusive como é realizado seu descarte final. Nesta pesquisa, é realizada uma revisão sistemática da literatura, para avaliar os impactos ambientais dos resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil, e como vários países ao redor do mundo estão gerenciando esses resíduos. A reciclagem tem sido um método para reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte dos módulos, a fim de tornar o ciclo de vida dos painéis mais sustentável, recuperar materiais de valor e evitar a contaminação do ambiente por metais perigosos. Métodos de reciclagem de painéis fotovoltaicos vêm sendo estudados e desenvolvidos, e as práticas atuais de reciclagem são identificadas neste trabalho. A necessidade de estabelecer políticas adequadas para o gerenciamento destes resíduos também é uma realidade no Brasil, onde o mercado fotovoltaico cresce a cada ano. Os impactos ambientais dos resíduos dos módulos é um tema que deve ser abordado e debatido com a população brasileira, além de se estabelecer a obrigatoriedade regulamentada da reciclagem e a fiscalização vigorosa, que precisam ser aplicadas para garantir um descarte adequado a este produto.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico, fim de vida útil, reciclagem, gestão de resíduos, impacto ambiental.

ABSTRACT

FINGER, Daniela Negri. **Impactos Ambientais e Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Painéis Fotovoltaicos**. 2019. Monograph. (Work Completion of Course) – Course of Electrical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

The electricity generation from photovoltaic solar panels has shown exponential growth worldwide. Due to their long average service life, the volume of photovoltaic cell waste is expected to grow rapidly in subsequent years. Although this technology generates no emissions during use, to be considered clean, its entire life cycle must be taken into account, including how its final disposal is performed. In this research, a systematic literature review is conducted to assess the environmental impacts of end-of-life photovoltaic panel waste and how various countries around the world are managing this waste. Recycling has been a method of reducing the environmental impacts caused by the disposal of modules in order to make the panel life cycle more sustainable, recover valuable materials and avoid contamination of the environment with hazardous metals. Photovoltaic panel recycling methods have been studied and developed, and current recycling practices are identified in this paper. The need to establish appropriate policies for the management of this waste is also a reality in Brazil, where the photovoltaic market grows every year. The environmental impacts of module waste is a topic that should be addressed and debated with the Brazilian population, in addition to the mandatory recycling obligation and vigorous supervision, which need to be applied to ensure proper disposal of this product.

Keywords: Photovoltaic panels, end-of-life, recycling, waste management, environmental impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção cumulativa da capacidade fotovoltaica global.	11
Figura 2 - Esquema de painel fotovoltaico.	12
Figura 3 - Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos. ...	14
Figura 4 - Sistema de produção de ciclo fechado.	15
Figura 5 - Estrutura básica dos painéis de silício.	21
Figura 6 - Estrutura básica painel CIGS (6a). Estrutura básica painel CdTe (6b).	22
Figura 7 - Opções para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (3Rs).....	32
Figura 8 - Processo de reciclagem da SolarWorld de módulos c-Si com método térmico.	35
Figura 9 - Processo de reciclagem da First Solar de módulos CdTe com método físico.	37
Figura 10 - Processo de reciclagem da ANTEC Solar GmbH de módulos CdTe com método físico.	38
Figura 11 - Número de patentes de procedimentos para tratamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida útil.....	40
Figura 12 - Fluxograma para o processo de revisão sistemática da literatura.	46
Figura 13 - Número de citações dos artigos do portfólio.	55
Figura 14 - Frequência dos Periódicos no portfólio final.	56
Figura 15 - Incidência das palavras-chave nos artigos.	57
Figura 16 - Impacto ambiental de um módulo fotovoltaico em três etapas.	66
Figura 17 - Potencial de recuperação em fim de vida no cenário de perdas regulares para 2030 expressos em toneladas.	67
Figura 18 - Criação de valor potencial por meio do gerenciamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida até 2030 e 2050.	68
Figura 19 - Estrutura conceitual para a cadeia de suprimentos circular do sistema de energia solar fotovoltaica.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação no mercado e eficiência dos painéis fotovoltaicos.....	19
Tabela 2 - Possibilidades de reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida...41	41
Tabela 3 - Eixos e Palavras-chave.....	47
Tabela 4 - Número de artigos obtidos nas bases de pesquisa.....	52
Tabela 5 - Resumo da filtragem do portfólio.....	52
Tabela 6 - Portfólio final de artigos.....	53
Tabela 7 - Análise de Conteúdo.....	59
Tabela 8 - Rentabilidade da reciclagem dos painéis fotovoltaicos.....	69
Tabela 9 - Detalhes de patentes recentes dos métodos de recuperação e reciclagem das células fotovoltaicas em fim de vida.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
CdCl ₂	Cloreto de cádmio
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Seleneto de cobre índio-gálio
CPV	Concentradores fotovoltaicos
c-Si	Silício cristalino
DTSC	Departamento de Controle de Substâncias Tóxicas da Califórnia
EVA	Acetato de vinil etileno
GW	Gigawatt
IEA-PVPS	<i>International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
kg	Quilograma
kWp	Quilo Watt-pico
mg/l	Miligramas por litro
mm	Milímetro
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
t	Toneladas
TCO	Óxidos condutores transparentes
TCLP	<i>Toxicity Characteristics Leaching Procedure</i>
TeCl ₄	Tetracloroeto de telúrio
µm	Micrometros
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM FIM DE VIDA	18
2.1.1 Tipos de Painéis Fotovoltaicos e sua Participação no Mercado	18
2.1.2 Composição dos Painéis Fotovoltaicos	20
2.1.3 Impactos Ambientais do Painéis Fotovoltaicos em Fim de Vida	23
2.2 GESTÃO DOS RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS	26
2.2.1 Políticas de Gerenciamento de Resíduos Fotovoltaicos Existentes no Mundo	27
2.2.2 Métodos para Gerenciamento de Resíduos Fotovoltaicos	32
2.2.2.1 Exemplos de Métodos Comerciais de Reciclagem dos Painéis Fotovoltaicos	34
2.2.2.2 Tecnologias de Reciclagem Fotovoltaica Estudadas em Todo o Mundo	39
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	44
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	44
3.2 MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	45
3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura	45
3.2.2 Análise Bibliométrica	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 RESULTADOS DA SELEÇÃO DO PORTFÓLIO	51
4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	54
4.2.1 Relevância dos Artigos	54
4.2.2 Relevância dos Periódicos	56
4.2.3 Incidência de Palavras-chave	57
4.3 DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO	58
5 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	81

ANEXOS	85
ANEXO A - DETALHES DE PATENTES RECENTES DOS MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM FIM DE VIDA.....	85

1 INTRODUÇÃO

A energia proveniente do sol vem sendo explorada pelo ser humano há muitos anos, inicialmente como uma forma de produzir vapor para girar motores e bombas de irrigação, e, com o passar dos anos, e dos avanços tecnológicos, para gerar energia elétrica.

Em 1954, a empresa americana *Bell Telephone Laboratories*, apresenta ao mundo a primeira célula solar fotovoltaica à base de silício (TIMILSINA *et al.*, 2012). Capaz de converter a energia solar em elétrica, ainda que com eficiência de apenas 6%, a célula fotovoltaica foi considerada revolucionária, pois apresentava ao mundo a possibilidade de aproveitamento de uma fonte de energia inesgotável, e desde então, as pesquisas ainda continuam avançando (MACHADO *et al.*, 2015).

A queda nos preços do petróleo, nos anos 1970, fez com que o mercado da energia solar estagnasse. Porém, voltou a se recuperar no início dos anos 2000, devido às políticas de apoio, à instabilidade nos preços dos combustíveis fósseis e limitação de suas reservas, além da queda nos custos dos dispositivos envolvidos na geração de energia fotovoltaica, devido aos grandes progressos tecnológicos neste setor. Outro fator fortemente envolvido no aumento expressivo da utilização da energia solar foram as crescentes preocupações em relação aos impactos ambientais causados pela emissão de gases de efeito estufa (TIMILSINA *et al.*, 2012).

Com motivação nesses fatores, a geração de energia solar fotovoltaica tem se expandido mundialmente, partindo de valores praticamente insignificantes ao início do século e apresentando um crescimento exponencial.

De acordo com estudos sobre previsões do crescimento da utilização de painéis fotovoltaicos, IRENA e IEA-PVPS (2016) realizaram uma projeção das taxas globais do seu crescimento até o ano de 2050, quando deverá atingir uma capacidade instalada de aproximadamente 4.512 GW. É o que mostra a Figura 1.

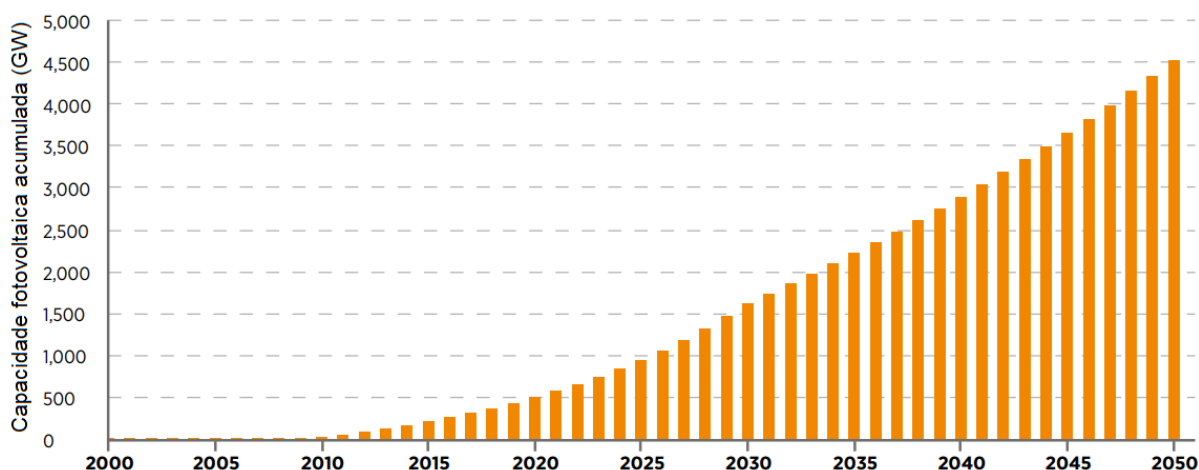


Figura 1 - Projeção cumulativa da capacidade fotovoltaica global.

Fonte: Adaptado de IRENA e IEA (2016).

Apesar deste crescimento expressivo ter sido influenciado por políticas de descarbonização dos sistemas de geração de energia, partindo do princípio de que a tecnologia fotovoltaica produz “energia verde”, sem emitir gases poluentes, para ser possível considerá-la como energia limpa e sustentável é necessário analisar seus impactos ambientais do início ao fim da vida útil dos dispositivos utilizados, o que vem sendo estudados desde os anos 1970 (HERNANDEZ *et al.*, 2014).

Para que seja possível ampliar a compreensão sobre os impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos é preciso, inicialmente, conhecer suas características funcionais, e também as construtivas.

As células solares são, geralmente, formadas pela combinação de camadas de materiais semicondutores, que possibilita o surgimento um campo elétrico permanente na região de junção das camadas. Quando expostos à luz, alguns elétrons do material absorvem fótons que, com essa energia extra, são acelerados, gerando uma corrente através da junção, e por consequência, uma diferença de potencial. Condutores são conectados em cada lado das células, permitindo coletar a eletricidade gerada (MACHADO *et al.*, 2015).

Para a fabricação dos painéis fotovoltaicos comerciais, as células são conectadas em série e encapsuladas em material polimérico. Na parte frontal, recebem uma camada de vidro temperado, e na parte inferior uma proteção, também de polímero específico. Todas as lâminas são montadas em uma estrutura metálica, geralmente alumínio (MACHADO *et al.*, 2015). A Figura 2 ilustra a composição do painel fotovoltaico.

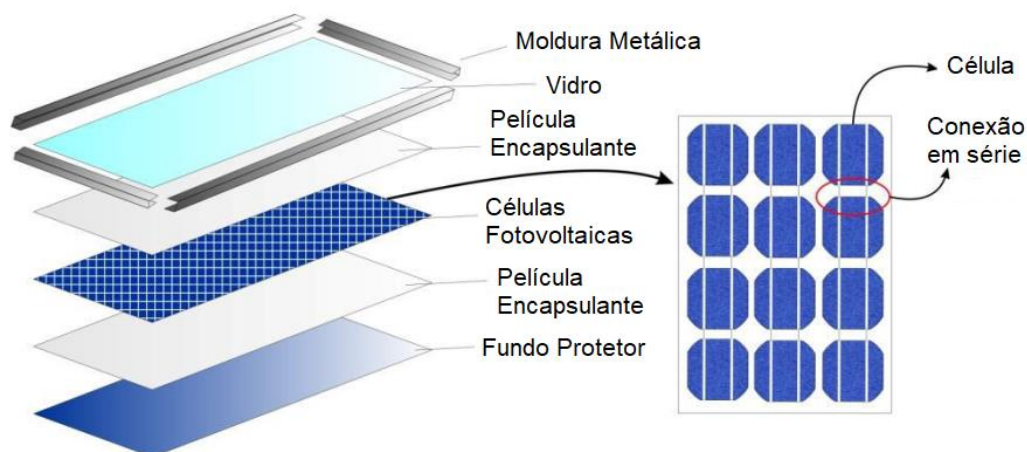


Figura 2 - Esquema de painel fotovoltaico.
 Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2014).

Existem vários tipos de células solares, com diferentes semicondutores e arranjo das camadas. A tecnologia mais usada, que domina 90% do mercado atual, é baseada em silício cristalino (c-Si). Presente em apenas 9% do mercado estão os painéis de *thin film*¹, e os painéis *dye-sensitised*² e os orgânicos³, que ainda estão no estágio pré-industrial. Tecnologias baseadas em arsenieto de gálio (multifuncionais III-V) são usadas em casos especiais como em naves espaciais, devido à sua alta eficiência (SICA *et al.*, 2018).

Os painéis fotovoltaicos c-Si, tem seu peso total compostos, tipicamente, por 76% de vidro, 10% de polímero, 8% de alumínio, 5% de silício, 1% de cobre e menos de 0,1% de prata e outros metais, principalmente estanho e chumbo. Já os painéis *thin film*, são também compostos principalmente por vidro, polímero e alumínio, porém utilizam quantidades de material reduzidas em relação ao anterior. Suas tecnologias atualmente dominantes são o telureto de cádmio (CdTe) e o seleneto de cobre índio-gálio (CIGS). As CdTe apresentam quantidades significativas de cádmio, já a CIGS inclui metais como cobre, índio, galio, selênio (LUNARDI *et al.*, 2018).

Portanto, para fabricar cada tipo de painel fotovoltaico, são necessários vários tipos de materiais, sendo alguns deles tóxicos, como por exemplo o cádmio,

1 Do inglês, película fina, tecnologia usada para produzir células solares no qual camadas muito finas de materiais fotovoltaicos são depositadas sobre um substrato de vidro ou aço.

2 Do inglês, sensibilizado com corantes, são células solares que geram eletricidade através de uma reação fotoeletroquímica de oxidação-redução que é desencadeada pela absorção da radiação solar pelo corante fotossensibilizador.

3 Células solares orgânicas são compostas de materiais biodegradáveis, introduzindo assim um risco de degradação e instabilidade do material.

utilizado nos módulos de *thin film*; e o chumbo, dos módulos c-Si. Acrescentam-se a isso o uso de metais raros, como o telúrio e o índio, e também metais preciosos, como a prata, usada nos contatos elétricos.

Vale destacar ainda a mineração do silício, que requer uma grande quantidade de combustíveis fósseis para o maquinário, além de oferecer uma variedade de riscos à saúde humana. Ou seja, em todo seu ciclo de vida, desde a produção de matérias-primas, seu processamento e purificação, a fabricação dos módulos, instalação, uso e descarte final, diversos impactos ambientais são gerados, pois são envolvidos recursos e fontes de energia não renováveis, produzindo resíduos e poluição (SICA *et al.*, 2018).

Quando os painéis fotovoltaicos atingem o fim de sua vida útil, todos esses metais são descartados, na maioria dos casos, em aterros sanitários. Desta forma, ainda mais impactos são gerados no meio ambiente, já que estes materiais tóxicos não recebem o tratamento correto, além de produzir desperdício dos metais raros e preciosos (LUNARDI *et al.*, 2018).

Além de gerar custos adicionais, o descarte em aterro não traz nenhum benefício ambiental ou econômico. Uma forma de se abordar a minimização deste problema é prover o tratamento adequado dos resíduos dos painéis fotovoltaicos, ao fim da vida útil, a partir de métodos de reciclagem, de forma a tornar essas tecnologias mais sustentáveis, recuperando materiais e reduzindo as emissões de dióxido de carbono (SICA *et al.*, 2018).

Por apresentar uma vida útil média de aproximadamente 30 anos, atualmente os volumes destes resíduos ainda são consideravelmente baixos, o que não gera atrativos econômicos para se desenvolver os processos de reciclagem. Ao se comparar, por exemplo, a reciclagem de dispositivos eletrônicos e de telecomunicações, que tem lucro recuperando materiais e peças preciosas, os módulos fotovoltaicos ainda não denotam quantidades suficientes desses materiais para arcar com os custos envolvidos no processo (LUNARDI *et al.*, 2018). Porém, a tendência mundial de crescimento da instalação de painéis fotovoltaicos, como mostrado na Figura 1, faz com que cresça também o volume de módulos descartados.

A Figura 3 mostra projeções realizadas por IRENA e IEA-PVPS (2016) para os volumes globais dos resíduos fotovoltaicos de 2016 até o ano de 2050, considerando um cenário (perda regular) em que os painéis operem por 30 anos

sem falhas; e outro (perda precoce) levando em conta painéis descartados antes da vida útil de 30 anos, devido a falhas.

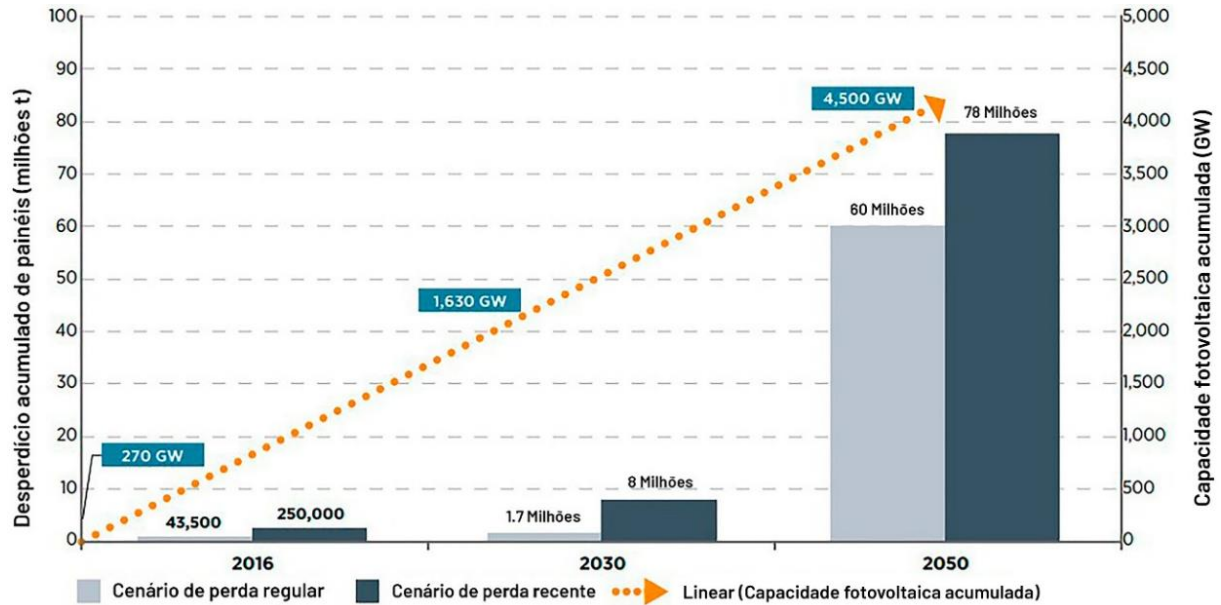


Figura 3 - Visão geral das projeções globais de resíduos de painéis fotovoltaicos.
 Fonte: Adaptado de IRENA e IEA-PVPS (2016).

No fim de 2016, foi atingido um total de 250 mil toneladas métricas de resíduo fotovoltaico, correspondendo apenas de 0,1 a 0,6% da massa acumulada dos painéis já instalados. No início da década de 2030, uma grande quantidade de painéis atingirá o fim de sua vida útil (de 30 anos), implicando em que se atinja entre 60 e 78 milhões de toneladas métricas cumulativamente até 2050 (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Esta tendência crescente é um grande desafio ambiental, mas também deve melhorar a relação custo-benefício dos processos de reciclagem, tornando-os viáveis economicamente, gerando uma recuperação de matéria-prima em alta escala, permitindo a aplicação em uma produção circular. Segundo a OECD, (2008), a produção circular fechada se baseia na revitalização de produtos descartados em novos recursos de produção, conforme mostrado na Figura 4, tornando o processo mais sustentável, e trazendo benefícios ambientais significativos.

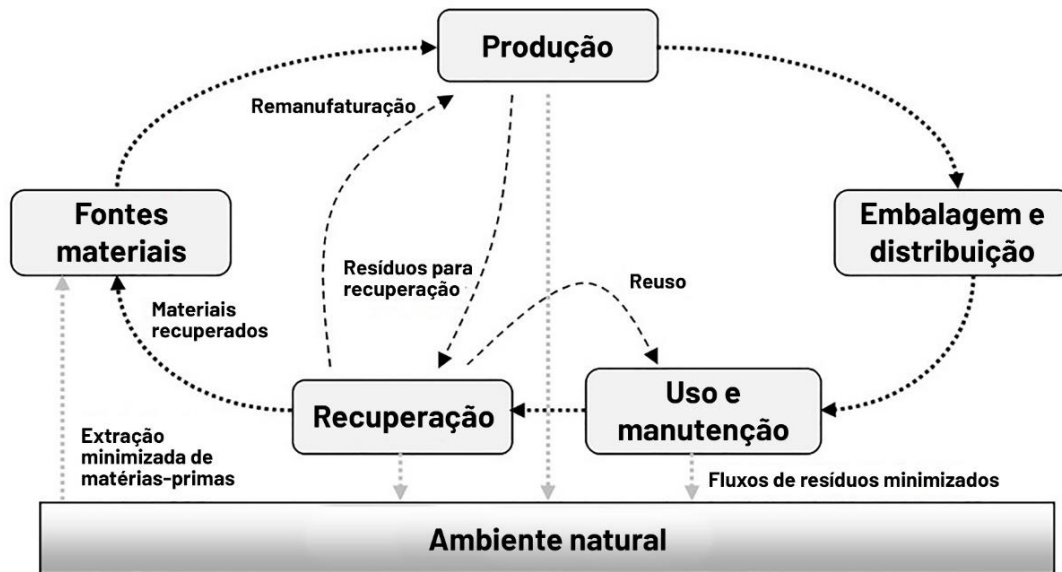


Figura 4 - Sistema de produção de ciclo fechado.
 Fonte: Adaptado de OECD (2009).

Portanto, a reciclagem dos painéis fotovoltaicos, além de reduzir os impactos ambientais de sua produção, apresenta grandes benefícios econômicos para a indústria. Por terem surgido apenas recentemente, os sistemas de reciclagem ainda não estão bem desenvolvidos, e se baseiam em processos de *downcycling*, recuperando apenas uma parte dos materiais e do valor dos painéis antigos. Apesar desta dificuldade atual de se recuperar de forma eficiente os materiais, a reciclagem é uma necessidade urgente, pois como previsto, em 2030 o nível dos resíduos fotovoltaicos se tornará significativo, e atualmente apenas 10% dos módulos são reciclados no mundo (LUNARDI *et al.*, 2018).

A falta de políticas que estabeleçam uma legislação adequada para o gerenciamento do lixo fotovoltaico gera um entrave na aplicação dos processos de reciclagem em vários países. A Europa já possui fortes regulamentações em vigor para o incentivo da reciclagem, e outros países já começam a se desenvolver neste caminho. Por este motivo, as pesquisas em relação aos impactos ambientais e os benefícios do tratamento dos resíduos fotovoltaicos são importantes (LUNARDI *et al.*, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar uma análise, a partir da literatura, dos impactos ambientais dos resíduos fotovoltaicos, caracterizando políticas e métodos de reciclagem associados ao final do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os impactos ambientais dos resíduos de painéis fotovoltaicos;
- Analisar as políticas e normas internacionais de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos;
- Identificar métodos e práticas atuais de reciclagem de resíduos de painéis fotovoltaicos;
- Prestar proposições para políticas de gerenciamento propício para resíduos fotovoltaicos no Brasil.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de o Brasil ainda está dando os passos iniciais no mercado fotovoltaico, já deve se preocupar com as futuras e crescentes implicações ao meio ambiente. Políticas para o gerenciamento destes resíduos necessitam ser desenvolvidas, em conformidade com condicionantes nacionais e com a maturidade deste setor no país, de modo a fortalecer a indústria da reciclagem fotovoltaica.

Com isso, há a necessidade de se analisar mais profundamente políticas e práticas de reciclagem de painéis fotovoltaicos existentes no mundo, de forma a auxiliar com futuras aplicações no cenário brasileiro.

Além de regulamentações adequadas, a reciclagem dos painéis fotovoltaicas necessita alcançar a viabilidade econômica. Ao se tornar lucrativa, a reciclagem será aplicada independentemente dos regulamentos. Desta forma, a seguinte pesquisa vem a contribuir com o setor da engenharia elétrica, de modo a estimular a indústria e pesquisadores a criar novos projetos de módulos, favorecendo os processos de reciclagem, para que se obtenha uma alta taxa de recuperação dos materiais.

Paralelo a isso, este trabalho busca incentivar a indústria a desenvolver novas tecnologias de painéis fotovoltaicos, baseados em materiais menos agressivos ao meio ambiente, tornando todo o ciclo de vida útil dos painéis mais sustentável.

1.3 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A monografia está dividida em 5 etapas. O capítulo inicial traz uma introdução e contextualização em torno do problema a ser pesquisado, além dos objetivos que se buscam alcançar com o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo dois será apresentada a fundamentação teórica da pesquisa, contendo uma revisão dos tipos de painéis fotovoltaicos existentes no mercado e de quais materiais são compostos, juntamente com os impactos ambientais causados por eles no fim de sua vida útil. Também é apresentada uma revisão das principais políticas de gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos que existem atualmente no mundo. E por fim, será apresentada quais as tecnologias de reciclagem fotovoltaica.

Já no terceiro capítulo será descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa, sua caracterização, juntamente com as etapas adotadas para coleta e análise de dados.

O capítulo quatro apresentará os resultados da revisão sistemática da literatura, a análise bibliométrica do portfólio final e a discussão.

Por fim, no quinto capítulo é realizada a conclusão da monografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado quais são os impactos ambientais causados pelos painéis fotovoltaicos em fim de vida, e como diversos países buscam fazer o gerenciamento destes resíduos. Além disso, serão abordados também quais os métodos atuais de reciclagem a nível comercial.

Antes de iniciar a análise das principais implicações ambientais, e do gerenciamento de painéis fotovoltaicos no final de sua vida, é importante avaliar quais as tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado e o

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM FIM DE VIDA

Os modelos de painéis mais utilizados mundialmente são os que podem trazer mais impactos ao meio ambiente ao atingirem seu fim de vida útil, devido ao volume de resíduos descartados futuramente. Além disso, políticas de gestão são desenvolvidas com base no tipo destes resíduos, se são perigosos e poluentes, de modo a definir seu tratamento e destinação final. E, portanto, é preciso melhor compreender que tipos de materiais são utilizados na composição de um painel fotovoltaico, e dentre os modelos de módulos, quais os mais utilizados em todo mundo.

2.1.1 Tipos de Painéis Fotovoltaicos e sua Participação no Mercado

Os painéis solares são dispositivos com a capacidade de converter a radiação solar em energia elétrica, a partir do chamado efeito fotovoltaico que ocorre no material semicondutor que compõem a célula solar. Os painéis são fabricados a partir da associação destas células, e são classificados de acordo com os tipos de materiais utilizados em sua composição (TAO; YU, 2015).

Atualmente, existem três gerações que categorizam os tipos de painéis fotovoltaicos. A primeira geração é a mais antiga, composta pelos painéis de Silício Cristalino (c-Si), sendo eles, monocristalino e multicristalino, este último também conhecido como policristalino, fita de silício e silício amorfo (a-Si). Os painéis de *thin film*, do inglês, filme fino, são a segunda geração, e apresentam dois diferentes tipos de módulos, o telureto de cádmio (CdTe) e o seleneto de cobre índio-gálio (CIGS). Por fim, a terceira geração, é composta por tecnologias emergentes, como os painéis solares orgânicos, *dye-sensitized*, concentradores fotovoltaicos (CPV), silício cristalino avançado, CIGS alternativos, perovskita, multifuncionais III-V. A primeira geração é a mais utilizada atualmente, devido sua alta eficiência frente aos painéis de segunda geração (XU *et al.*, 2018). As participações no mercado de cada tipo de painel, juntamente com sua eficiência, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Participação no mercado e eficiência dos painéis fotovoltaicos.

Geração	Tipo	2010	2015	2020	2030	Eficiência
Silício	Monocristalino	86%	92%	73,3%	44,8%	23%
	Multicristalino					18,5%
	Fita					16%
	a-Si					10%
<i>Thin film</i>	CIGS	1%	2%	5,2%	6,4%	18%
	CdTe	13%	5%	5,2%	4,7%	16%
Outros	CPV	-	1%	1,2%	0,6%	17-24%
	Orgânico/ <i>dye-sensitised</i>			5,8%	8,7%	10%
	c-Si avançado			8,7%	25,6%	20%
	CIGS alternativo, perovskita, multifuncionais III-V			0,6%	9,3%	15%

Fonte: Adaptado de SICA *et al.* (2018).

Se observa na Tabela 1, que para os próximos anos, haverá uma maior participação das novas tecnologias no mercado fotovoltaico, porém, os painéis a base de silício ainda serão dominantes no mercado até o ano de 2030. Também é possível notar um crescimento da aplicação de módulos CIGS, devido sua tendência de melhorias em sua eficiência, já o CdTe não tem tendência a crescer. Vale ressaltar que os painéis a-Si não tem sido mais fabricados pelas indústrias, devido a sua baixa eficiência. Além disso, atualmente sua participação no mercado é praticamente imperceptível, não gerando uma preocupação com o gerenciamento de seus resíduos de fim de vida (SICA *et al.*, 2018).

A tecnologia CPV, opera com o uso de lentes e espelhos curvos, que seguem o movimento do sol durante o dia, focando a luz solar nas células

fotovoltaicas. Apresenta um bom rendimento porém, devido ao custo do sistema, não possui números significativos no mercado. As demais tecnologias da terceira geração podem alcançar quase 10% de participação até 2030, porém, ainda não são largamente aplicadas no mercado fotovoltaico. É importante enfatizar também, que a estrutura dos painéis é a mesma para as três gerações, mudando em sua maioria apenas o componente fotossensível, que representa em torno de 3,5% do peso total do painel fotovoltaico (PADOAN *et al.*, 2019).

Dessa forma, CPV e as outras tecnologias e painéis não serão abordados estudados neste trabalho pois, devido sua baixa utilização pelos consumidores, o volume de seus resíduos por hora não se apresenta como um grande problema para a sociedade. Portanto, apenas os módulos da primeira e segunda geração serão estudados, com exceção do a-Si, que não contém volumes significativos de materiais valiosos ou perigosos e está caindo em desuso.

2.1.2 Composição dos Painéis Fotovoltaicos

Os componentes dos painéis fotovoltaicos mais usados no mercado fotovoltaico são o que permite definir quais os resíduos dos módulos em fim de vida, e a forma como estes devem ser tratados e descartados. As tecnologias a base de silício e as *thin film* operam de forma diferente, portanto diferentes materiais são utilizados em sua construção.

Os painéis c-Si são fabricados com o chamado silício de grau solar, ou seja, um silício de alta pureza, com o qual se fazem os *wafers* (bolachas), que passam por um processo de dopagem, e são transformadas em células. Para que seja possível formar o campo elétrico, as partes frontal e traseira da célula são conectadas com uma pasta de prata e alumínio, impressas em formato de grade. A superfície da célula apresenta textura, que permite diferenciar a tecnologia empregada. As células de silício monocristalino possuem estruturas de pirâmides, já no caso do multicristalino se observa estruturas aleatórias (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

As células são então interconectadas eletricamente em série, formando as chamadas *strings*, onde são utilizadas, geralmente, 60 ou 72 células. Em

seguida, as células conectadas são encapsuladas em um filme protetor, conhecido como EVA. Por fim, recebe uma camada de vidro especial em sua superfície, e uma folha traseira protetora de polímero, todo o conjunto é fixado em uma moldura de alumínio (LUNARDI *et al.*, 2018), conforme ilustra a Figura 5.

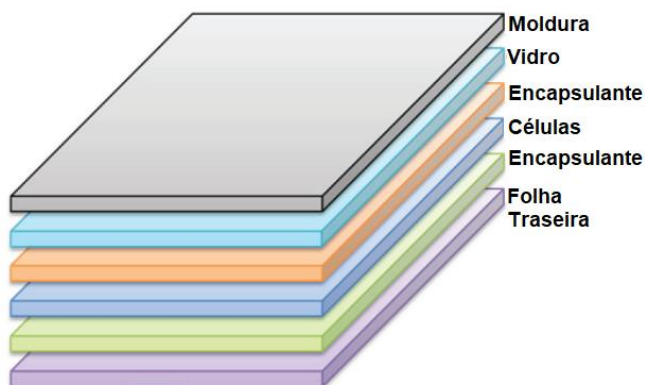


Figura 5 - Estrutura básica dos painéis de silício.
 Fonte: Adaptado de Lunardi *et al.* (2009).

Em geral, painéis em estrutura de alumínio com 60 células, tem o peso de 18,6 kg, tipicamente compostos por, 76% de vidro, 10% de polímero (EVA e folha traseira), 8% de alumínio (moldura), 5% de silício (células solares), 1% de cobre (interconexões) e menos de 0,1% de prata (linhas de contato) e outros metais, principalmente estanho e chumbo (LUNARDI *et al.*, 2018). Também podem ser encontradas pequenas quantidade de zinco, ferro e titânio (PADOAN *et al.*, 2019).

Os painéis fotovoltaicos *thin film* possuem uma tecnologia mais complexa em relação aos c-Si, fabricadas com menores quantidades de material, permitindo se obter diversas geometrias e de custo reduzido. Esses painéis são formados por camadas finas de material semicondutor, e as principais tecnologias representantes são o CIGS e o CdTe (LUNARDI *et al.*, 2018).

Os módulos CIGS possuem alto coeficiente de absorção da luz, permitindo assim a utilização de uma fina camada de semicondutor (cobre, índio, gálio e selênio). Conforme mostra a Figura 6a, a camada inicial é um substrato utilizado para se depositar as camadas, podendo ser de vidro, aço ou polímero, o que permite obter diversas geometrias de painéis. É utilizado um contato traseiro condutor metálico, que possibilita a adesão do substrato com a camada fotovoltaica, que vem em seguida. Essa camada fotovoltaica é a responsável por absorver a luz solar e é formada por cobre, índio, gálio e selênio. O sulfeto de cádmio é necessário

como uma camada de bloqueio, que protege a camada fotovoltaica das reações do óxido de zinco, que compõem o contato condutor frontal, chamada camada janela composta de óxidos condutores transparentes (TCO). Na superfície frontal, é inserido um encapsulamento e uma camada de vidro para proteção. Um painel CIGS geralmente possui 20 kg. Do seu peso total, os painéis CIGS são compostos por 89% de vidro, 7% de alumínio e 4% de polímero. Outros metais incluem 10% de cobre, 28% de índio, 10% de gálio e 52% de selênio, que representam menos de 1% do peso do painel (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

No caso dos painéis CdTe, podem ser utilizadas configurações de substrato, igual ao apresentado para o CIGS, ou superestrato, sendo que a segunda traz melhores resultados em relação a eficiência, e as camadas de TCO, sulfeto de cádmio e CdTe, são depositadas no superestrato de vidro. A camada traseira pode ser feita de em cobre/alumínio, cobre/grafite ou grafite dopada com cobre. Por fim, se tem ainda uma camada encapsulante polimérica e a folha traseira. Este tipo de configuração é mostrado na Figura 6b. Seu peso médio é de 12 kg, sendo composto em 97% de vidro e 3% polímero. Atualmente, a espessura típica da camada de CdTe é de apenas 3 μm , correspondendo a 0,13% do painel, composta por cádmio e telúrio, podendo se encontrar também outros metais, como níquel, zinco, estanho e chumbo (IRENA; IEA-PVPS, 2016).



Figura 6 - (6a) Estrutura básica painel CIGS. (6b) Estrutura básica painel CdTe.
Fonte: Adaptado de Lunardi *et al.* (2009).

2.1.3 Impactos Ambientais do Painéis Fotovoltaicos em Fim de Vida

A avaliação dos resíduos de painéis fotovoltaicos é realizada levando em conta os materiais que o compõe. Ela permite classificar os resíduos e seus possíveis riscos ao meio ambiente, e também à saúde humana, no fim de sua vida útil. Com isso, as entidades governamentais podem definir como devem ser tratados os resíduos em seu descarte final, de modo a evitar esses efeitos negativos.

Esta classificação dos resíduos é feita em categorias, como inertes, resíduos perigosos ou não perigosos. Também existem subcategorias, como para lixo eletrônico, resíduos de construções, entre diversas outras. Como abordado na seção anterior, os painéis de s-Ci e *thin film* tem grande parte de seu peso composto por vidro, alumínio e polímero, que fazem parte da categoria dos resíduos não perigosos. Porém, como visto, nos módulos s-Ci existem materiais como silício, prata, estanho e chumbo, e nos do tipo *thin film*, podem se encontrar pequenas quantidades de cobre, zinco, índio, gálio, selênio, cádmio, telúrio e chumbo. Estes materiais podem ser classificados como resíduos perigosos, dependendo das normativas de cada país, e assim exigem tratamento especial em seu descarte (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

O critério utilizado para realizar esta classificação dos resíduos fotovoltaicos são os chamados testes de lixiviação, chamados de procedimento de lixiviação de características de toxicidade (do inglês, *Toxicity Characteristics Leaching Procedure* - TCLP). Estes testes são realizados em laboratório, e seguem normas específicas, que determinam o tamanho da amostra, o solvente a ser utilizado, temperatura para realização, tempo de duração do teste, entre outros fatores. Neste teste, pedaços de painéis são colocados em materiais líquidos, por determinado tempo, em seguida são observadas as concentrações de substâncias neste lixiviado. Se o material é considerado como perigoso, não deve ser descartado em aterros sanitários sem receber tratamento específico (BANG *et al.*, 2018).

Alguns países, como Japão, Alemanha e Estados Unidos determinam as concentrações permitidas de lixiviados para categorizar o resíduo como perigoso. Segundo apresentado por IRENA e IEA-PVPS (2016), para o chumbo, ser classificado como perigoso em um painel, nos Estados Unidos, a concentração de

lixiviados deve ser de 5 mg/L, já no Japão esse limite cai para 0,3 mg/L. No caso do Cádmiu, o limite varia de 1 mg/L nos Estados Unidos, até 0,1 mg/L na Alemanha.

Desta forma, se pode concluir que certos materiais são classificados como perigosos, ao meio ambiente e aos seres humanos, de acordo com sua concentração, e com a legislação com a qual se compara. Na literatura podem ser encontrados diversos testes de lixiviação TCPL.

O estudo realizado por Bang *et al.* (2018), é tomado como exemplo, e apresenta procedimento TCPL para avaliar o potencial de resíduos perigosos em módulos fotovoltaicos de silício multicristalino e de painéis CIGS. Os testes foram realizados tomando como base a regulamentação federal americana e estadual da Califórnia, e foram executados com diversos metais que compõem os painéis, como prata, alumínio, cobre, selênio, entre diversos outros. Segundo os resultados obtidos, os módulos apresentaram a presença de resíduos perigosos ao meio ambiente. No caso do módulo de c-Si, foi encontrada uma concentração de 6,1 mg/L de chumbo, excedendo o limite regulatório de 5 mg/L. Os módulos CIGS, por sua vez, apresentaram 2,3 mg/L de cádmio, ultrapassando o limite regulamentado de 1 mg/L. Painéis de silício monocristalino não foram avaliados nos testes, pois, segundo o autor, o módulo é muito similar ao multicristalino.

Diversos testes de TCLP realizados com módulos CdTe, apresentados por Cyrs *et al.* (2014), apresentaram concentrações de lixiviados consideráveis de metais como chumbo, selênio e cádmio. Porém, dentre eles, apenas o cádmio excedeu os limites regulamentares americanos de 1 mg/L de concentração, tendo resultados apresentados na literatura chegando até 9,5 mg/L.

Os efeitos causados pela toxicidade do cádmio têm sido amplamente estudados. Dependendo dos níveis de acúmulo, pode causar clorose⁴ em plantas, necrose, intoxicação ou morte de animais. A intoxicação em seres humanos traz efeitos colaterais como fraqueza, febre e vômito, em casos de alta exposição pode levar a enfisema pulmonar, disfunção renal e danos aos ossos, como osteoporose. (MALANDRINO *et al.*, 2017). Atualmente, materiais compostos de cádmio são regulados em muitos países, devido à sua toxicidade ao meio ambiente, plantas, e animais, que podem afetar os seres humanos através da cadeia alimentar (SICA *et al.*, 2018). A contaminação pelo chumbo, por sua vez, tem diferentes efeitos

⁴ Amarelecimento ou branqueamento das folhas de plantas, devido a produção insuficiente de clorofila, podendo levar a planta a morte.

bioquímicos e fisiológicos, pode causar danos no sistema nervoso central, sistema cardiovascular, sistema endócrino, sendo que alguns efeitos são dor de cabeça, tremores, irritabilidade, alucinações, perda de memória, coma, entre outros (MALANDRINO *et al.*, 2017).

Os painéis fotovoltaicos contêm também outras substâncias, que podem lixiviar do módulo, além do chumbo e do cádmio, mas que não excedem os limites regulamentados. Embora represente menos de 1% da massa dos painéis, esses dois metais produzem os maiores efeitos negativos ao meio ambiente se comparados aos demais metais dos painéis (XU *et al.*, 2018).

Estes possíveis riscos ambientais causados pela disposição final de módulos fotovoltaicos em aterros, sem receber tratamento adequado, dependem da proximidade de águas subterrâneas, rios, da integridade do forro do aterro, dentre outros fatores. Os resíduos tóxicos dos painéis depositados em aterros são capazes de lixiviar contaminantes nas fontes de água subterrânea, que pode acarretar em um ciclo de efeitos negativos, como os citados anteriormente. Esses materiais classificados como tóxicos compõem uma pequena parte dos módulos, e como atualmente os volumes de painéis descartados ainda são baixos, devido sua longa vida útil, a lixiviação ainda não causa impactos significativos. Porém, como visto no capítulo um, existe uma forte tendência de crescimento dos resíduos fotovoltaicos, e com isso os riscos ambientais causados pela lixiviação dos contaminantes se torna preocupante (CYRS *et al.*, 2014).

Tomando como base as tendências de crescimento do descarte de painéis em fim de vida, é possível prever o descarte inadequado de 2151 toneladas de chumbo, em 2050, com lixiviação média de 1741,2 toneladas, e 877 toneladas de cádmio, com uma lixiviação média de 302,5 toneladas (SICA *et al.*, 2018).

Além dos possíveis impactos de contaminação das águas pela lixiviação do cádmio e do chumbo, outros problemas ambientais também estão associados aos painéis em fim de vida útil, se não forem descartados de forma adequada. Como citado no capítulo um, espera-se que em 2050 se atinjam entre 60 e 78 milhões de toneladas métricas de painéis em fase de descarte. O descarte destes módulos em aterros, acarreta na perda de toneladas de recursos que podem ser recuperados e reutilizados, como o alumínio e o vidro, que compõem a maior parte dos módulos, além do silício e metais raros, como a prata, índio, gálio e telúrio (XU *et al.*, 2018).

A recuperação destes materiais descartados pode reduzir os potenciais níveis de depleção de recursos causada pela fabricação dos módulos. O esgotamento de recursos ambientais, necessários para a fabricação do módulo, é uma preocupação ambiental a ser levada em conta. O estudo realizado por Bang *et al.* (2018), apresenta que as maiores potenciais de depleção de metais utilizados em módulos fotovoltaicos são para a prata e para o selênio. Esses metais compõem pequenas quantidades em comparação com os maiores contribuintes para as massas dos módulos fotovoltaicos. Porém, com a crescente tendência de utilização desta tecnologia, os resultados dos potenciais de depleção indicam que as tecnologias devem ser desenvolvidas de modo que se tornem menos dependentes de metais especiais. O adequado gerenciamento dos módulos fotovoltaicos em fim de vida, pode auxiliar na recuperação destes materiais, de modo a evitar problemas ambientais relacionados ao ciclo de vida dos metais e para evitar riscos econômicos devido à escassez de sua oferta.

2.2 GESTÃO DOS RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS

Como visto anteriormente, na composição dos painéis fotovoltaicos existem diferentes materiais, dentre os quais alguns são tóxicos, raros e outros preciosos. Deste modo, a gestão adequada dos módulos em fim de vida útil é uma etapa de grande importância, não apenas para se obter o gerenciamento adequado de substâncias perigosas, como o cádmio e o chumbo, que trazem efeitos nocivos ao meio ambiente, mas também para permitir a recuperação de recursos (SICA *et al.*, 2018).

Apesar das análises indicarem os potenciais perigos dos resíduos fotovoltaicos, do ponto de vista regulamentar, os resíduos de painéis fotovoltaicos ainda se enquadram na classificação geral de resíduos em diversos países. No caso do Brasil, a realização da classificação dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), em relação aos seus potenciais riscos ao meio ambiente, deve ser executada de acordo com a norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Embora não se tenha uma regulamentação própria, os painéis podem ser classificados como equipamento elétrico eletrônico. Porém,

atualmente não existe nenhuma norma no país que especifique de forma clara o enquadramento destes resíduos em relação a sua origem, natureza e periculosidade (MIRANDA *et al.*, 2019).

No âmbito federal, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, define a política de tratamento para os resíduos sólidos em geral, e é aplicada também no gerenciamento de REEE. Segundo seu artigo nº 33, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos elétricos eletrônicos, devem criar e aplicar o chamado sistema de logística reversa, que seja independente do serviço de limpeza pública e de gestão de resíduos sólidos. A logística reversa é um sistema de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que se baseia em um conjunto de ações com as quais é possível coletar os produtos em seu fim de vida útil e retorná-los ao meio empresarial, para serem reaproveitados ou receberem a destinação final adequada. Porém, segundo Miranda *et al.* (2019), a fiscalização do gerenciamento adequado de REEE no Brasil não é eficiente, e a prática de logística reversa não é controlada e supervisionada apropriadamente, exceto para o caso de embalagens de agrotóxicos e pneus.

Entretanto, devido as tendências de crescimento de resíduo nos próximos anos, alguns países já iniciaram discussões em torno do assunto. A seguir, são apresentadas políticas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos já existentes ao redor do mundo. Nos locais onde o mercado fotovoltaico já se estabeleceu a vários anos, como na União Europeia, as práticas de gestão já são fortemente aplicadas e seguidas, e podem ser exemplo para possíveis futuras implementações de gestão de resíduos fotovoltaicos em outros países, como por exemplo, no território brasileiro, onde ainda não se possui um gerenciamento adequado.

2.2.1 Políticas de Gerenciamento de Resíduos Fotovoltaicos Existentes no Mundo

Na União Europeia, em agosto de 2012, entrou em vigor a diretiva 2012/19/EU, na qual os painéis fotovoltaicos foram definidos como equipamentos elétricos e eletrônicos, incluídos na categoria 4 do anexo I, e como consequência os módulos em fim de vida foram classificados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (do inglês, *Waste Electrical and Electronic Equipment* -

WEEE). Os principais objetivos da Diretiva Europeia são preservar, proteger e melhorar a qualidade do meio ambiente, proteger a saúde humana e utilizar os recursos naturais de maneira prudente e racional (PADOAN *et al.*, 2019; LUNARDI *et al.*, 2018).

De acordo com a diretiva, desde fevereiro de 2014, todos os países da União Europeia devem possuir regulamentação para a coleta, transporte e tratamento de módulos no fim de vida útil, sendo isso de responsabilidade dos fabricantes. A responsabilidade ampliada do produtor, implica que produtores de painéis fotovoltaicos se tornam responsáveis por cobrir os custos relacionados com o gerenciamento dos módulos em fim de vida dentro do mercado europeu. Eles são responsáveis pelo financiamento de pontos públicos de coleta e instalações de tratamento dos painéis (TASNIA *et al.*, 2018).

O Reino Unido foi o primeiro a aplicar a diretiva 2012/19 da União Europeia, em relação ao gerenciamento dos resíduos dos módulos fotovoltaicos, a transformando na Lei nº 3113. Esta, entrou em vigor em 1º de janeiro de 2014, e estabeleceu que todos os painéis presentes no mercado do Reino Unido, sejam eles importados ou produzidos no em seu território, possuam um plano de conformidade do produto registrado, onde os fabricantes são obrigados a divulgar todos os dados dos painéis fotovoltaicos, como o número e o tipo de módulos produzidos ou importados. Com isso, o governo é capaz de prever os fluxos destes resíduos (XU *et al.*, 2018).

Na Alemanha, desde março de 2005, a Lei ElektroG, definia a gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. Em outubro de 2015 a Lei recebeu alterações, baseada na normativa da União Europeia, estabelecendo as obrigações dos produtores em relação a coleta, triagem, desmontagem, reciclagem ou descarte de resíduos fotovoltaicos (TASNIA *et al.*, 2018). A partir disso, para poder comercializar na Alemanha, fabricantes e importadores de painéis devem estar devidamente registrados pela ElektroG. Os municípios alemães têm a possibilidade de coletar os painéis que seriam descartados pelos consumidores, enviando aos fabricantes, que realizam pagamento pela tarefa. Algumas empresas particulares também realizam esses serviços para os fabricantes, incluindo até mesmo processos de reciclagem (MIRANDA *et al.*, 2019).

Segundo Malandrino *et al.* (2017), no caso da Itália, segue-se o Decreto Legislativo nº 49, de 14 de março de 2014, que também implementa a normativa da

União Europeia, incluindo os painéis fotovoltaicos desativados em REEE domésticos e profissionais, buscando melhorar o uso de matérias-primas, a fim de promover um uso mais eficiente dos recursos naturais. No fim da vida útil, os módulos são classificados de acordo com o uso, profissional ou residencial (potência menor que 10 kWp), e também, em relação a data de instalação, sendo históricos os instalados antes do decreto 49/2014, e novos os instalados após. O fabricante não assume a responsabilidade de gerenciamento do resíduo em caso de painéis fotovoltaicos históricos, devendo ser realizado pelo proprietário. Porém, o fabricante assume a gestão do módulo descartado no caso em que o proprietário deseje realizar a substituição por um novo painel.

Poucos países fora do mercado da União Europeia já tomaram medidas para regular os painéis solares residuais. Países como China, Japão, Índia, Estados Unidos, e outros, apresentam um mercado fotovoltaico que cresce rapidamente, mas que ainda necessitam de políticas específicas para módulos fotovoltaicos em fim de vida, pois ainda classificam esses resíduos de acordo com base em uma estrutura regulatória genérica para resíduos sólidos perigosos e não perigosos ou REEE (LUNARDI *et al.*, 2018).

O Japão tem dado os primeiros passos para o gerenciamento adequado dos resíduos fotovoltaicos. No ano de 2016, o Ministério do Meio Ambiente, publicou uma guia com o intuito de incentivar a gestão para os módulos em fim de vida, determinando que os fabricantes se envolvessem na reciclagem de painéis solares (MIRANDA *et al.*, 2019). Em 2017, a Associação de Energia Fotovoltaica do Japão (JPEA) publicou diretrizes voluntárias de como se deve realizar a gestão dos resíduos dos módulos, além de solicitar que fabricantes, importadores e distribuidores fornecessem dados sobre os materiais utilizados em sua composição (LUNARDI *et al.*, 2018). Atualmente, empresas nacionais de fabricação de equipamentos solares, realizam diversas pesquisas sobre tecnologias de reciclagem, em parceria com países europeus (XU *et al.*, 2018).

O estado da Califórnia, nos Estados Unidos, é um forte mercado de energia solar. Em 2015 aprovou a Lei nº 489, que define que o Departamento de Controle de Substâncias Tóxicas da Califórnia (DTSC) deve promover e regulamentar a gestão, de forma a reduzir a quantidade de resíduos perigosos em aterros. Como visto na seção 2.1.3, o estado da Califórnia possui suas próprias normas que definem os níveis máximos de lixiviação. Desta forma, os componentes

dos módulos considerados como perigosos recebem tratamento especial na categoria chamada resíduo universal, a mesma de baterias, pesticidas, entre outros tipos de resíduos que não podem ser descartados no lixo. A Califórnia possui uma infraestrutura robusta de reciclagem, possuindo até mesmos mapas que indicam os centros de reciclagem mais próximos onde se pode realizar descarte adequado. Já em Washington, foi aprovada a Lei nº 5939, em 2017, que exige a implementação de sistemas de logística reversa e reciclagem no gerenciamento de painéis fotovoltaicos em fim de vida (MIRANDA *et al.*, 2019; TASNIA *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, a China se tornou líder em capacidade instalada de módulos solares, porém sem regulamentação específica para a gestão do lixo fotovoltaico. Segundo Xu *et al.* (2018), o Instituto de Pesquisa em Ciências Ambientais da China tem realizado estudos de gerenciamento ambiental do impacto da indústria fotovoltaica no meio ambiente, incluindo os efeitos de componentes de equipamentos solares reciclados. Porém, atualmente os níveis de resíduos fotovoltaicos são baixos, pois os módulos ainda não atingiram o fim de vida útil, e isso tem prejudicado as pesquisas e o desenvolvimento de regras para gestão.

Além da China, diversos outros países com o mercado fotovoltaico crescente, como Coreia e Índia, ainda não possuem regras que exigem a coleta, recuperação e reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim de vida.

Devido a criação das leis e normas, que preveem o gerenciamento adequado para os módulos fotovoltaicos em alguns países, surgiram projetos e organizações para realizar e aprimorar essas tarefas de gestão dos resíduos. O CU-PV, criado em 2012, é um projeto de pesquisa que recebe fundos da União Europeia para desenvolver tecnologias de módulos fotovoltaicos que utilizem menores quantidades de materiais em sua fabricação, e também tecnologias de reciclagem, buscando tornar os módulos produtos mais sustentáveis. Também recebendo incentivos financeiros da União Europeia, o projeto recuperação fotovoltaica total de fim de vida útil (do inglês, *Full Recovery End of Life Photovoltaic* - FRELP), foi criado em parceria com a organização *PV Cycle*, e pesquisa processos de tratamento buscando ampliar os níveis de materiais recuperados com a reciclagem de módulos a base de silício (MIRANDA *et al.*, 2019).

Existem três principais iniciativas de reciclagem que foram voluntariamente criadas por fabricantes de painéis fotovoltaicos e que podem ser

generalizadas para ser usadas como modelos de gestão: *PV Cycle*, *First Solar* e *SolarWorld AG*.

A *PV Cycle* foi criada em 2007, pela indústria fotovoltaica europeia, para efetivar o compromisso dos fabricantes europeus em criar um programa voluntário para a coleta e reciclagem de módulos em fim de vida útil (MCDONALD; PEARCE, 2010). A *PV Cycle* é uma organização sem fins lucrativos, baseada em membros, que gerencia resíduos fotovoltaicos para empresas em todo o mundo. Sua equipe inclui consultores em gerenciamento de resíduos de painéis solares e pesquisadores, oferecendo técnicas de reciclagem para as tecnologias mais frequentes no mercado (XU *et al.*, 2018). Os fabricantes membros do *PV Cycle*, adotam o conceito de responsabilidade do produtor, e buscam oferecer uma solução de energia solar completamente sustentável, assumindo a responsabilidade pelos módulos fotovoltaicos durante todo o ciclo vida (PADOAN *et al.*, 2019).

A empresa americana *First Solar*, primeira a produzir módulos baseados em CdTe, em 2002, preocupada com a utilização de um metal pesado tóxico em um produto considerado como verde, criou um programa de coleta e reciclagem. Segundo McDdonald e Pearce (2010), o programa faz o registro de cada módulo vendido pela empresa, coleta os módulos quando forem desativados e realiza a reciclagem para recuperar os materiais. Com a venda de cada módulo, eles reservam os valores necessários para arcar com as despesas da coleta e reciclagem, incluindo os custos com embalagem e transporte dos painéis coletados. Este programa se aplica apenas para os módulos fabricados pela *First Solar*, mas é um exemplo de método eficiente de gestão a ser seguido por demais empresas.

Como último exemplo, tem-se o programa de gestão criado pela *SolarWorld AG*, empresa alemã, que busca reciclar módulos que sofreram qualquer tipo de dano, como por exemplo, quebra de vidro, laminado com defeito ou falhas elétricas, recebendo os módulos voluntariamente. Devido ao projeto, e das demais responsabilidades ambientais, a *SolarWorld* foi classificada como referência geral entre fabricantes de módulos de silício cristalino pelo relatório da *Silicon Valley Toxic Coalition* (Coalizão Tóxica do Vale do Silício) (MCDONALD; PEARCE, 2010).

2.2.2 Métodos para Gerenciamento de Resíduos Fotovoltaicos

A gestão adequada dos painéis fotovoltaicos em fim de vida possibilita a criação de valor no ciclo de vida dos módulos. Os princípios clássicos de gestão de resíduos 3Rs, que são a redução, reutilização e a reciclagem, podem ser aplicados ao gerenciamento painéis fotovoltaicos em fase de descarte final. A Figura 7 mostra as opções para gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, indicando entre as mais e menos preferidas.

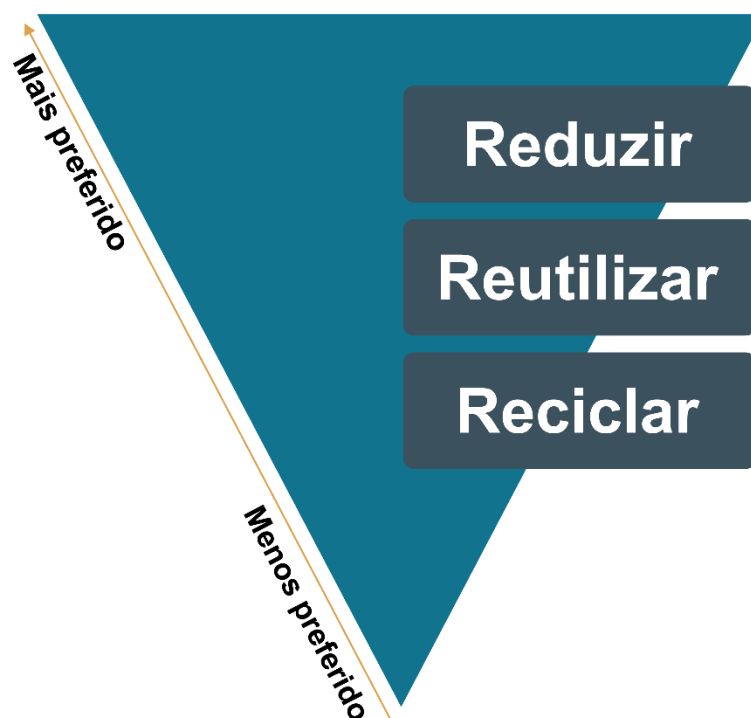


Figura 7 - Opções para o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos (3Rs)
Fonte: Adaptado de IRENA e IEA-PVPS (2016).

A redução das quantidades de material utilizado na composição dos painéis fotovoltaicos é a opção de gestão mais preferida e deve ser realizada nos estágios de fabricação. O crescimento exponencial deste mercado e as previsões de escassez dos recursos necessário à fabricação dos módulos, impulsionam a criação de tecnologias mais eficiente que necessitam de uma menor quantidade de matérias-primas. De acordo com IRENA e IEA-PVPS (2016), já existem tendências da diminuição das quantidades de materiais utilizados na fabricação dos painéis solares para o ano de 2030. Para a tecnologia de c-Si, a principal redução é para o

silício de 5% para 3% do peso total do módulo, e de 1% no alumínio. Os módulos CIGS tendem a reduzir a massa de vidro em 1%, e uma ligeira redução de 0,02% de metais como cobre, índio, gálio e selênio. A massa de vidro também deve diminuir em 1% para os painéis CdTe, e o uso de material semicondutor deverá cair quase pela metade, de 0,13% para 0,07%. O método de gestão de resíduos através da redução traz benefícios ambientais em relação aos módulos em fim de vida útil, pois a longo prazo tendem a gerar menos volumes de lixo fotovoltaico.

A segunda estratégia, para o gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos, é a reutilização. Muitos módulos podem apresentar defeitos precocemente e nestes casos, se forem viáveis, reparos podem ser realizados, assim os painéis podem ser revendidos para reutilização. Alguns países já possuem até mesmo plataformas para comercialização de painéis usados, a um custo reduzido. Previsões indicam que os painéis também podem permanecer intactos ao fim de sua vida útil média de 30 anos, e após passar por inspeções de qualidade e reformas, caso necessário, poderão ser também reutilizados. Com isso, é possível concluir que técnicas de gestão aplicando a reutilização reduzem as quantidades de módulos descartados, pois voltam para o mercado (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

A reciclagem é a última estratégia de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, sendo a menos preferida, somente aplicada nos casos em que os painéis não puderam ser reutilizados. Ela permite recuperar matérias-primas para a fabricação de novos painéis fotovoltaicos ou de outros produtos. Tecnologias de reciclagem vem sendo pesquisadas nos últimos 15 anos. Porém, devido aos baixos volumes de resíduos fotovoltaicos, os métodos de reciclagem ainda não são economicamente atrativos para a instalação de plantas de reciclagem exclusivamente dedicadas a resíduos fotovoltaicos, que em geral tem recebido tratamento em centros de reciclagem comuns, onde não se consegue recuperar totalmente os materiais de maior valor (MIRANDA *et al.*, 2019).

Devido a estrutura dos módulos fotovoltaicos ser formada por camadas, conforme mostrado anteriormente pelas Figuras 5 e 6, para ser possível reciclá-los, são necessários processos para separar camadas, alcançar os semicondutores, e separar materiais diferentes. Desta forma, se pode dividir a reciclagem dos módulos fotovoltaicos em fim de vida basicamente em três estágios, sendo eles a delaminação, separação de materiais e extração ou purificação de metais. Diferentes tecnologias podem ser aplicadas em cada estágio (TAO; YU, 2015).

Atualmente, poucos processos de reciclagem têm sido aplicados em escala comercial, mas diversos outros processos, baseados em técnicas experimentais mecânicas, térmicas e químicas estão sendo pesquisados e financiados por indústrias e por programas de pesquisa, como os anteriormente apresentados (SICA *et al.*, 2018).

Na parte seguinte desta seção, são expostos exemplos de métodos comerciais de reciclagem de módulos fotovoltaicos, em seguida será apresentada uma visão geral dos recentes progressos em pesquisas sobre tecnologias de reciclagem e processos patenteados.

2.2.2.1 Exemplos de Métodos Comerciais de Reciclagem dos Painéis Fotovoltaicos

O processo de reciclagem, aplicado em escala comercial, para módulos c-Si, foi desenvolvido pela empresa *SolarWorld*, em 2003, e se baseia no tratamento térmico (SICA *et al.*, 2018). Primeiramente, os módulos encaminhados para a reciclagem, são incinerados para realizar o processo de delaminação. Nesta etapa, é feita a separação do EVA, com isso, os componentes plásticos são queimados em um complexo processo de proteção de semicondutores, a 600 °C. As altas temperaturas modificam as características dos módulos, decompondo o EVA, o que permite, na sequência, executar a separação mecânica das células solares limpas, do vidro e metais, como o cobre, prata, chumbo e alumínio. Essa separação é realizada manualmente, o vidro e os metais são enviados para outras empresas, para reciclagem e reutilização adequada (LUNARDI *et al.*, 2018; PADOAN *et al.*, 2019; TAO; YU, 2015).

Na sequência, as células de silício são processadas novamente, com isso se obtém novas bolachas, que podem ser utilizadas para fabricar novas células solares (SICA *et al.*, 2018). A Figura 8 mostra as etapas do processo. Um estudo realizado em 2007 pelo *PV Cycle* demonstrou que as bolachas recicladas possuem o mesmo valor de bolachas novas. Este processo de reciclagem é bastante eficaz, podendo recuperar mais de 84% do peso inicial do painel. As taxas de recuperação do vidro são maiores de 90%, e de 95% dos materiais semicondutores. É possível recuperar até 98% de células não danificadas, dependendo das condições do módulo, pois se as células contiverem lascas ou microfissuras, elas não podem

gerar uma bolacha inteira, mas podem ser usadas para se obter matéria-prima de silício. Além disso, células com espessura acima de 200 μm apresentam menos quebras, e possuem alta taxa de recuperação (LUNARDI *et al.*, 2018; TAO; YU, 2015).

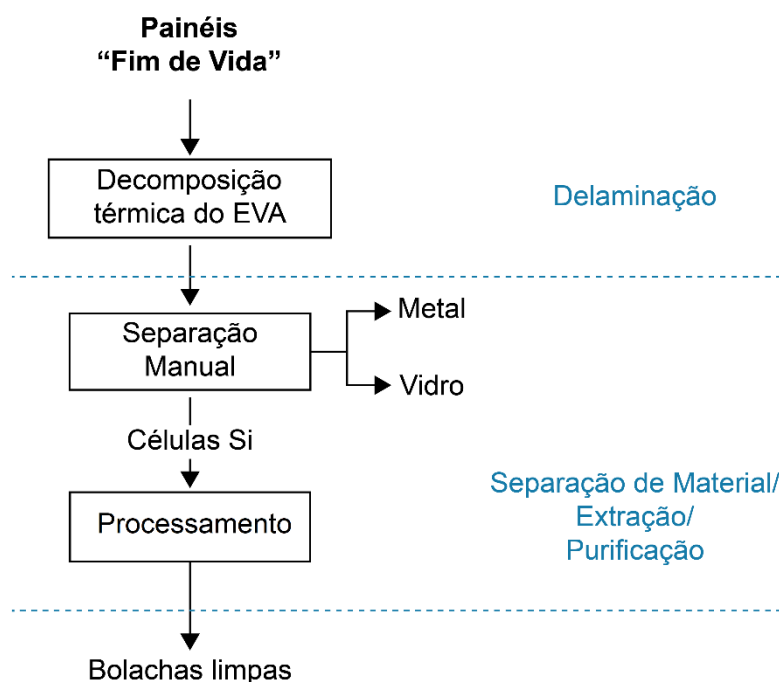


Figura 8 - Processo de reciclagem da SolarWorld de módulos c-Si com método térmico.
 Fonte: Adaptado de Tao e Yu (2015).

Apesar de se obter uma alta recuperação de materiais, esse processo possui algumas limitações. De acordo com Padoan *et al.* (2019), o tratamento térmico necessita de um elevado consumo de energia para ser executado, e isso gera dúvidas em relação a sustentabilidade buscada pelos processos de reciclagem. Uma forma de melhoria deste aspecto seria pela utilização desta energia por combustão em outros processos ou no pré-aquecimento de novas cargas. Porém, no processo da *SolarWorld*, por exemplo, nenhuma recuperação de energia é prevista. Segundo Lunardi *et al.*, (2018), Tao e Yu (2015), este método precisa ser aprimorado, eliminando a separação manual, pois a falta de um processo automatizado limita sua eficiência e seus benefícios econômicos, e dificulta o atendimento das crescentes demandas esperadas para os próximos anos.

A empresa *First Solar* aplica um método de reciclagem, para seus módulos *thin film* do tipo CdTe, baseado na delaminação física. A empresa realiza esse processo de reciclagem em todas suas fabricas nos Estados Unidos, e também em uma filial na Alemanha, sendo que cerca de 90% da massa dos painéis reciclados é transformada em novos produtos (TAO; YU, 2015).

O processo reciclagem começa com a britagem superficial dos módulos em pedaços grandes, para facilitar o transporte. Na sequência, os pedaços passam por martelos trituradores, onde são moídos em pedaços de até 5 mm, pequenos o suficiente para quebrar as ligações de laminação. Então, os filmes semicondutores, passam por um tratamento químico, e são removidos pelo processo de lixiviação com a adição de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio em um tambor de aço inoxidável de rotação lenta. Esta etapa leva entre 4 a 6 horas para ser finalizada. O material passa então por um classificador que realiza a separação do sólido, composto por vidro e EVA, e do líquido, rico em metal. Os resíduos sólidos passam por uma peneira vibratória, que separa o vidro das partes maiores do EVA. Em seguida, se realiza uma limpeza extra do vidro para remover qualquer material residual, por fim o vidro é enviado para a reciclagem apropriada. O material líquido, por sua vez, passa por uma etapa de precipitação, onde os compostos metálicos são precipitados e, em seguida, concentrados em um tanque espessante, para serem então enviados para uma empresa especializada, onde os metais são refinados, obtendo-se telúrio e cádmio, para ser utilizado em novos módulos solares. A Figura 9 mostra as etapas deste método, que atinge altas taxas de recuperação, sendo de 90% para o vidro e 95% do semicondutor, reduzindo notavelmente o risco de danos ambientais associados à liberação de cádmio no ambiente (LUNARDI *et al.*, 2018; SICA *et al.*, 2018; TAO; YU, 2015).

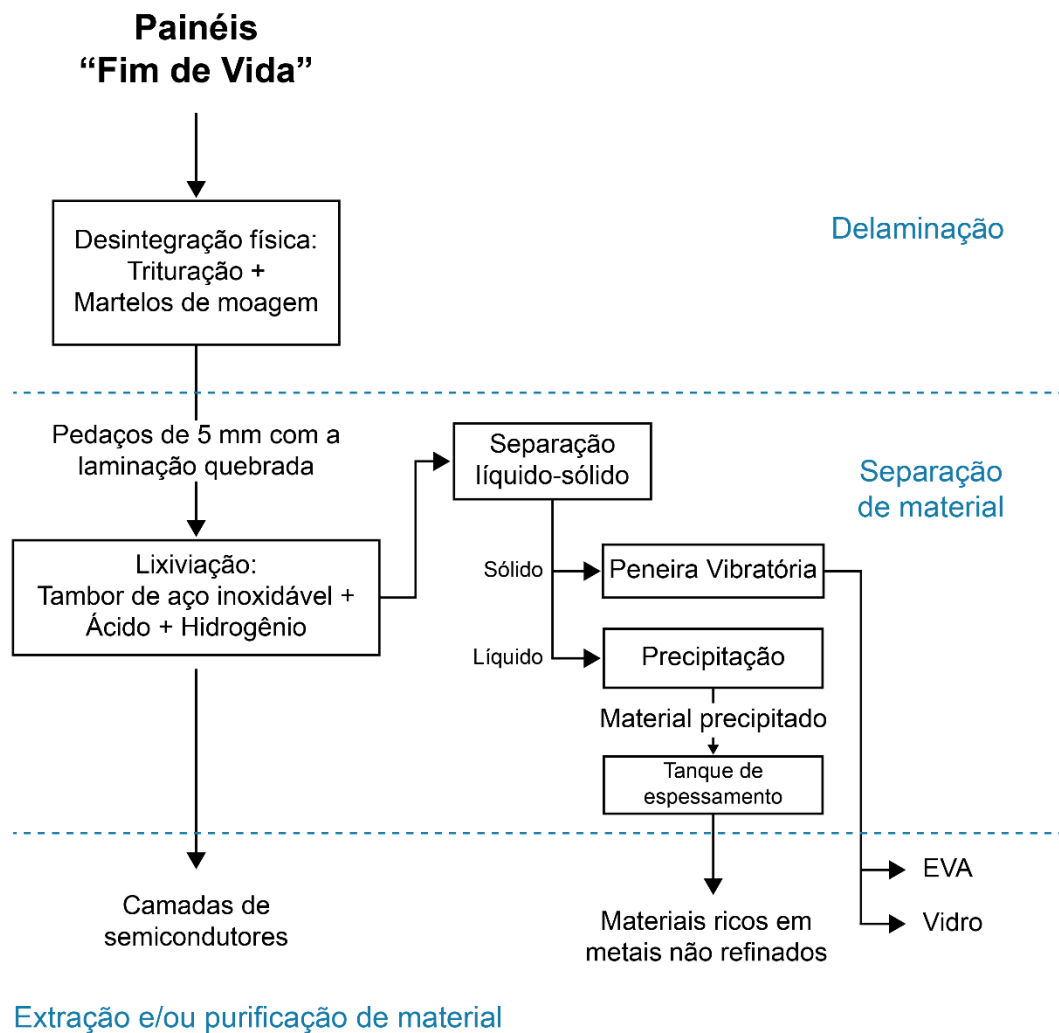


Figura 9 - Processo de reciclagem da *First Solar* de módulos CdTe com método físico.
Fonte: Adaptado de Tao e Yu (2015).

Recentemente, o processo da *First Solar* foi submetido a novos estudos para testar sua eficácia também em tecnologias emergentes, como os módulos CIGS. O processo de reciclagem das células solares do CIGS é similar ao de CdTe, e envolve a colocação de materiais em um processo de banhos ácidos para recuperar os metais, incluindo cobre, selênio, índio e gálio. O vidro é processado através de decomposição térmica, dissolução de solvente ou ácido para remover quaisquer camadas fotovoltaicas restantes e é recuperado (MCDONALD; PEARCE, 2010; SICA *et al.*, 2018).

A empresa *ANTEC Solar GmbH* possui uma instalação em escala piloto para reciclagem de módulos CdTe. No seu processo, os painéis passam pela fragmentação física, como no método da *First Solar*. Em seguida, esses fragmentos são expostos em uma atmosfera com oxigênio a 300° C, causando a delaminação

do EVA. Então, são levados a uma atmosfera de gás com cloro a 400° C, o que causa um processo de decapagem, em que o CdCl_2 e TeCl_4 são obtidos, sendo então condensados e precipitados por resfriamento. Este processo de decapagem a seco tem vantagens de ser mais econômico e ambientalmente amigável, frente a decapagem úmida, como a utilizada pelo método da *First Solar*, pois se o solvente não for reutilizado, é gerada uma grande quantidade de resíduos líquidos orgânicos voláteis, difíceis de tratar (LUNARDI *et al.*, 2018; TAO; YU, 2015; XU *et al.*, 2018). A Figura 10 apresenta os passos desse processo de reciclagem.

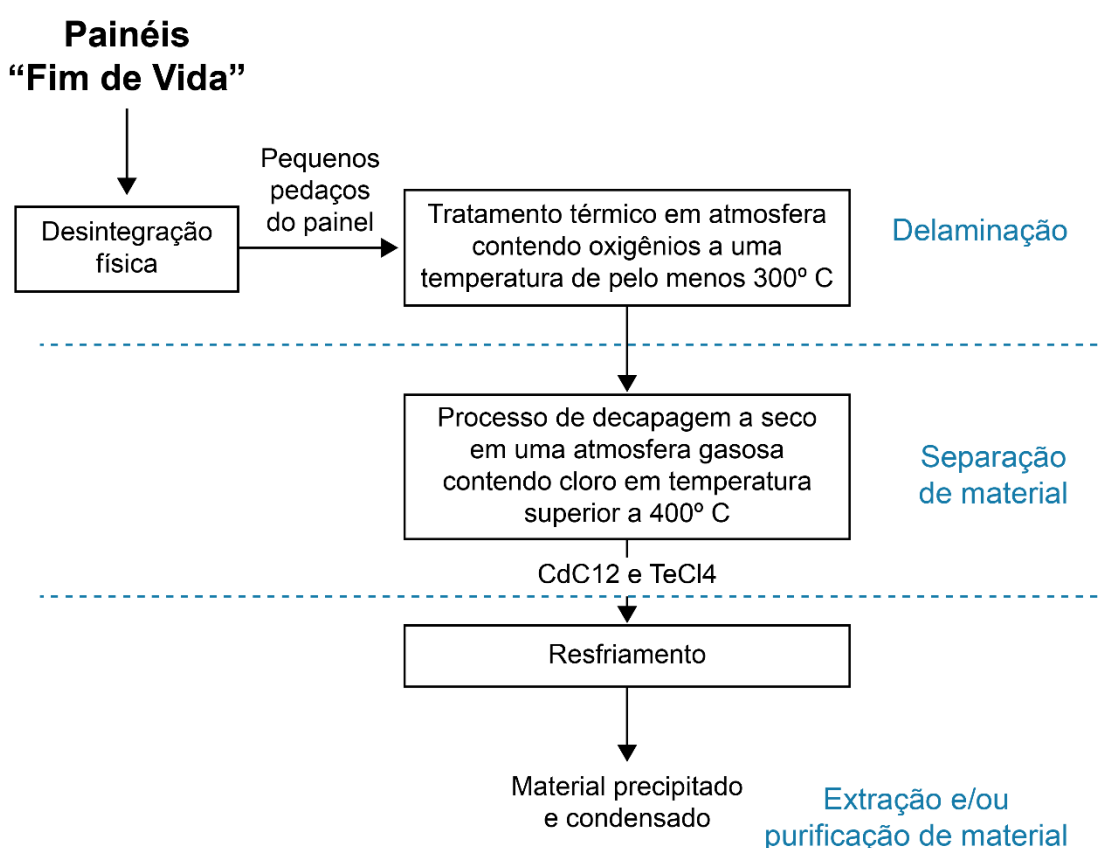


Figura 10 - Processo de reciclagem da ANTEC Solar GmbH de módulos CdTe com método físico.

Fonte: Adaptado de Tao e Yu (2015).

A delaminação física, aplicada pela *First Solar* e pela *ANTEC Solar GmbH*, como passo inicial de seus métodos de reciclagem, é um processo capaz de lidar com resíduos de módulos fotovoltaicos de vários tipos, porém não é capaz de separar totalmente a camada semicondutora, portanto, outras técnicas necessitam ser aplicadas de forma complementar. Além disso, não é possível o uso direto de células após a delaminação física. O método físico tem a vantagem de ser barato e

permitir a recuperação direta do vidro, mas não pode recuperar materiais de alto valor, além disso, o esmagamento e o atrito produzem uma grande quantidade de poeira e criam poluição sonora (TAO; YU, 2015; XU et al., 2018).

Os tratamentos químicos para separação dos resíduos fotovoltaicos são focados na recuperação dos metais do módulo, principalmente de metais de alto valor, como os presentes nos módulos *thin film*. Este procedimento geralmente é executado após um tratamento físico ou térmico, e embora os reagentes químicos utilizados não tenham um custo elevado, como o ácido sulfúrico e o peróxido de hidrogênio, a aplicação do método gera grandes volumes de resíduos líquidos, o que limita a sustentabilidade econômica e ambiental do procedimento. Porém, isso pode ser balanceado com os benefícios econômicos e ambientais gerado pela recuperação dos metais raros e preciosos e perigosos (PADOAN; *et al.*, 2019).

2.2.2.2 Tecnologias de Reciclagem Fotovoltaica Estudadas em Todo o Mundo

Nas últimas duas décadas, diversos estudos foram realizados desenvolvendo processos para reciclar módulos fotovoltaicos em fim de vida útil. Várias técnicas de reciclagem vêm sendo testadas para atender a variedade de painéis atualmente disponíveis no mercado, bem como aqueles que ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento. Segundo Padoan *et al.* (2019), a grande maioria destes métodos de reciclagem foram desenvolvidos e patenteados por grandes empresas do setor fotovoltaico, com o objetivo de recuperar bolachas e matérias-primas, para serem reutilizadas em seus processos produtivos. A Figura 11 mostra o número de patentes registradas relacionadas a técnicas de tratamento de resíduos fotovoltaicos.

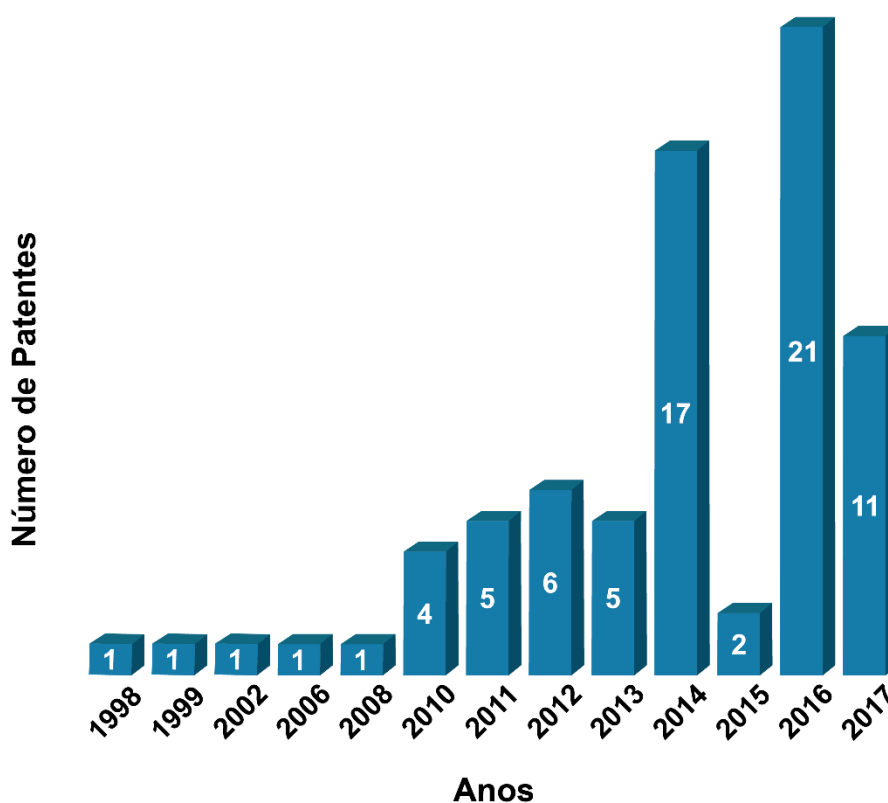


Figura 11 - Número de patentes de procedimentos para tratamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida útil.

Fonte: Adaptado de Mahmoudi *et al.* (2019).

Na Figura 11 é possível notar o crescimento significativo do número de patentes registradas ao longo dos últimos anos, indicando que a recuperação de materiais e a reciclagem dos módulos fotovoltaicos em fim de vida é uma preocupação do meio científico.

No Anexo A, desta monografia, é apresentada a Tabela 9, onde estão listadas as 76 patentes registradas de processos de reciclagem e métodos de recuperação de resíduos fotovoltaicos. Nesta tabela, estão expostos o ID de cada patente, com seu respectivo título original em inglês, a tecnologia fotovoltaica para qual o método se aplica, localização onde o registro foi realizado e o ano de publicação. Para Mahmoudi *et al.*, (2019), ao se realizar uma análise do cenário das patentes, se observa a falta de uma avaliação ambiental destes procedimentos de recuperação e reciclagem de painéis fotovoltaicos. Ademais, as patentes listadas na Tabela 9 trazem uma oportunidade para a realização de uma avaliação da rentabilidade financeira de vários métodos, para identificar as opções mais adequadas e vantajosas, podendo ser tema de trabalhos de pesquisa futuros.

A Tabela 2 traz um resumo geral das possibilidades de reciclagem de módulos solares de silício e *thin film*, desenvolvidos nos últimos anos, abordando as vantagens e desvantagens de cada método, e qual o status de aplicação de cada um, ou seja, se está em escala piloto, de pesquisa, ou se já é aplicado em escala comercial.

Tabela 2 - Possibilidades de reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida.

Tecnologias disponíveis	Status	Tipo de módulo	Vantagens e desvantagens	
Delaminação	Dissolução de ácido nítrico	Piloto / Pesquisa	c-Si	<input checked="" type="checkbox"/> Remoção completa de EVA e revestimento de metal na bolacha. <input checked="" type="checkbox"/> Possível recuperação da célula intacta. <input checked="" type="checkbox"/> Defeitos celulares devido a ácidos inorgânicos. <input checked="" type="checkbox"/> Emissões prejudiciais. <input checked="" type="checkbox"/> Tratamento de solução de resíduos.
	Dissolução de solvente (química orgânica)	Pesquisa	c-Si / <i>thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Fácil acesso ao EVA. <input checked="" type="checkbox"/> Menos dano celular. <input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de vidro. <input checked="" type="checkbox"/> O tempo necessário para a delaminação depende da área. <input checked="" type="checkbox"/> Tratamento de solução de resíduos.
	Irradiação por solvente e ultrassom	Pesquisa	c-Si	<input checked="" type="checkbox"/> Mais eficiente que o processo de dissolução de solventes. <input checked="" type="checkbox"/> Fácil acesso ao EVA. <input checked="" type="checkbox"/> Equipamento caro. <input checked="" type="checkbox"/> Tratamento de solução de resíduos
	Irradiação por laser	Pesquisa	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Fácil acesso ao EVA. <input checked="" type="checkbox"/> Processo lento. <input checked="" type="checkbox"/> Equipamento muito caro.
	Separação mecânica por corte a fio quente	Pesquisa	c-Si / <i>thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Menos dano celular. <input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de vidro. <input checked="" type="checkbox"/> Outros processos de separação necessários para a remoção completa do EVA.
	Tratamento térmico	Comercial / pesquisa	c-Si / <i>thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Remoção completa do EVA. <input checked="" type="checkbox"/> Possível recuperação de células intactas e reutilização direta de bolachas (para módulos c-Si). <input checked="" type="checkbox"/> Processo simples e economicamente viável. <input checked="" type="checkbox"/> Emissões nocivas. <input checked="" type="checkbox"/> Exigências de alta energia. <input checked="" type="checkbox"/> Defeitos pequenos das células c-Si e degradação devido à alta temperatura.
	Aquecimento eletro-térmico	Pesquisa	c-Si	<input checked="" type="checkbox"/> Fácil remoção do vidro. <input checked="" type="checkbox"/> Nenhuma emissão gerada pela queima de EVA <input checked="" type="checkbox"/> Processo lento.

	Desintegração física	Comercial	c-Si / <i>thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Capaz de tratar a mistura de resíduos. <input checked="" type="checkbox"/> Outros processos de separação necessários para a remoção completa do EVA. <input checked="" type="checkbox"/> Geração de poeira contendo metais pesados. <input checked="" type="checkbox"/> Quebra de células solares, não é possível reutilizar. <input checked="" type="checkbox"/> Desgaste/corrosão do equipamento.
Separação de materiais	Processo mecânico seco e úmido	Comercial	c-Si / <i>thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Sem produtos químicos do processo. <input checked="" type="checkbox"/> Processos simples. <input checked="" type="checkbox"/> Equipamento amplamente disponível. <input checked="" type="checkbox"/> Requisitos de baixa energia. <input checked="" type="checkbox"/> Sem remoção de sólidos dissolvidos
	Jateamento a vácuo	Piloto	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Remoção de camadas de semicondutores sem dissolução química. <input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de vidro limpo. <input checked="" type="checkbox"/> Processo relativamente lento. <input checked="" type="checkbox"/> Emissão de fração metálica com abrasivos. <input checked="" type="checkbox"/> Tratamentos químicos ou mecânicos adicionais necessários antes da purificação.
	Atrito	Piloto	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Sem uso de produtos químicos. <input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de vidro limpo. <input checked="" type="checkbox"/> Tratamentos químicos ou mecânicos adicionais necessários antes da purificação.
	Flutuação	Piloto	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Processo relativamente simples. <input checked="" type="checkbox"/> Menos uso de produtos químicos. <input checked="" type="checkbox"/> Perdas consideráveis de valores durante a lavagem e peneiração das entradas do processo. <input checked="" type="checkbox"/> Processo de flotação em vários estágios necessário. <input checked="" type="checkbox"/> Pureza inadequada de materiais separados.
	Decapagem (química)	Comercial / piloto / pesquisa	c-Si	<input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de materiais de alta pureza. <input checked="" type="checkbox"/> Processo simples e eficiente. <input checked="" type="checkbox"/> Uso de produtos químicos.
	Decapagem a seco	Comercial	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Processo menos complicado. <input checked="" type="checkbox"/> Alta demanda de energia. <input checked="" type="checkbox"/> Alto esforço necessário para purificação.

	Lixiviação	Comercial / piloto / pesquisa	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Remoção completa de metais. <input checked="" type="checkbox"/> É possível extrair mais metais da solução. <input checked="" type="checkbox"/> Alto uso de produtos químicos e possível geração de vapores ácidos. <input checked="" type="checkbox"/> Controle complicado de reações químicas
	Microemulsões à base de tensão	Piloto	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Recuperação de vidro limpo e semicondutores não dissolvidos em produtos químicos. <input checked="" type="checkbox"/> Componentes orgânicos intactos (EVA). <input checked="" type="checkbox"/> Requer baixa energia. <input checked="" type="checkbox"/> Emulsões devem ser adaptadas a diferentes tecnologias celulares.
Extração/ purificação de material	Processo hidrometalúrgico	Comercial / piloto	<i>Thin film</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Aplicável comercialmente em curto tempo. <input checked="" type="checkbox"/> Emissões baixas e controláveis. <input checked="" type="checkbox"/> Fluxos de processo robustos e comprovados, com base em opções técnicas viáveis. <input checked="" type="checkbox"/> Gerenciamento fácil de água. <input checked="" type="checkbox"/> Muitas etapas de separação e concentração. <input checked="" type="checkbox"/> As etapas do processo químico devem ser adaptadas à respectiva tecnologia.

Fonte: Adaptado de Tao e Yu (2015) e Lunardi *et al.* (2018).

Cabe ressaltar que não foram explorados neste trabalho, de forma detalhada, todos os métodos e procedimentos de reciclagem de módulos em fim de vida existentes, devido a amplitude do tema e a complexidade de cada processo de modo particular. Essa abordagem seria inviável para as dimensões desta monografia, podendo prejudicar o cumprimento dos objetivos propostos, que além dos métodos de reciclagem, envolvem também os impactos ambientais dos resíduos fotovoltaicos e as políticas de gerenciamento.

Na seção a seguir, será abordada a metodologia de pesquisa aplicada para se realizar o levantamento bibliográfico dos artigos utilizados para a realização desta pesquisa.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

As pesquisas surgem da necessidade de se buscar a solução para um problema existente. Para a sua realização, é necessário um planejamento sistemático, com etapas preestabelecidas que permitam alcançar os objetivos desejados da pesquisa. Com isso, o processo de pesquisa pode ser classificado de acordo com sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos (SILVA; MENEZES, 2005).

Neste capítulo será apresentada a caracterização desta pesquisa, a metodologia com todas as etapas planejadas necessárias para sua execução.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002), uma pesquisa pode ser de natureza básica ou aplicada. Este trabalho se enquadra na pesquisa de natureza aplicada, pois visa um problema específico, os impactos ambientais dos resíduos de painéis fotovoltaicos, envolvendo interesse local, neste caso, o Brasil.

A abordagem do problema é feita de forma qualitativa, sendo descritiva, onde os dados coletados no conteúdo de artigos são analisados de indutivamente, não requerendo métodos estatísticos. O foco principal são os processos e seus significados (SILVA; MENEZES, 2005).

Como a reciclagem de resíduos fotovoltaicos ainda não é aplicada e amplamente discutida no Brasil, esta pesquisa assume um objetivo exploratório, de modo a proporcionar proximidade com o tema para que este fique evidente, através de levantamento bibliográfico (GIL, 2002).

Em relação ao procedimento técnico, foi adotado o levantamento bibliográfico, o qual, segundo Silva e Menezes (2005), se apoia em material já publicado, como livros, artigos científicos de periódicos, teses e outros.

Com a pesquisa propriamente caracterizada, é possível realizar seu desenvolvimento. Neste trabalho a metodologia adotada foi a revisão sistemática da literatura, que será detalhada no tópico a seguir.

3.2 MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Esta seção apresenta de forma detalhada a etapas abordadas no procedimento de pesquisa, juntamente com os métodos aplicados para obtenção e análise dos dados.

3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

Para a execução da investigação bibliográfica é aplicada a técnica de revisão sistemática da literatura. De acordo com Cordeiro *et al.* (2007), a revisão sistemática é um modelo que se baseia em métodos rigorosos e explícitos para identificar, selecionar, coletar dados, analisar e descrever as contribuições relevantes à pesquisa. Nas revisões sistemáticas, as investigações ocorrem a partir de estudos primários, que por sua vez foram selecionados por meio de método sistemático e pré-definido.

Antes de iniciar o processo de revisão, é preciso definir quais as bases de dados, disponíveis no portal de periódicos da Capes, que mais se associem ao tema pesquisa. A base de dados bibliográficos IEEE *Xplore Digital Library* (IEEE) foi selecionada devido sua especificidade técnica. Sendo que as bases bibliográficas de editoras, como a IEEE, possuem apenas artigos por ela publicados. Nakagawa *et al.* (2017) sugere a importância de se utilizar as chamadas bases de dados motores. Estes motores de buscas possuem artigos de diversas editoras, permitindo aprimorar as buscas. Neste caso, serão utilizadas as bases *Scopus* e *Web of Science*, devido à amplitude. Todas as bases escolhidas são acessíveis a partir do Portal Periódicos Capes.

Com as bases de buscas já definidas, é possível dar início as etapas referentes ao método de revisão sistemática da literatura que são apresentadas na Figura 12, a seguir.

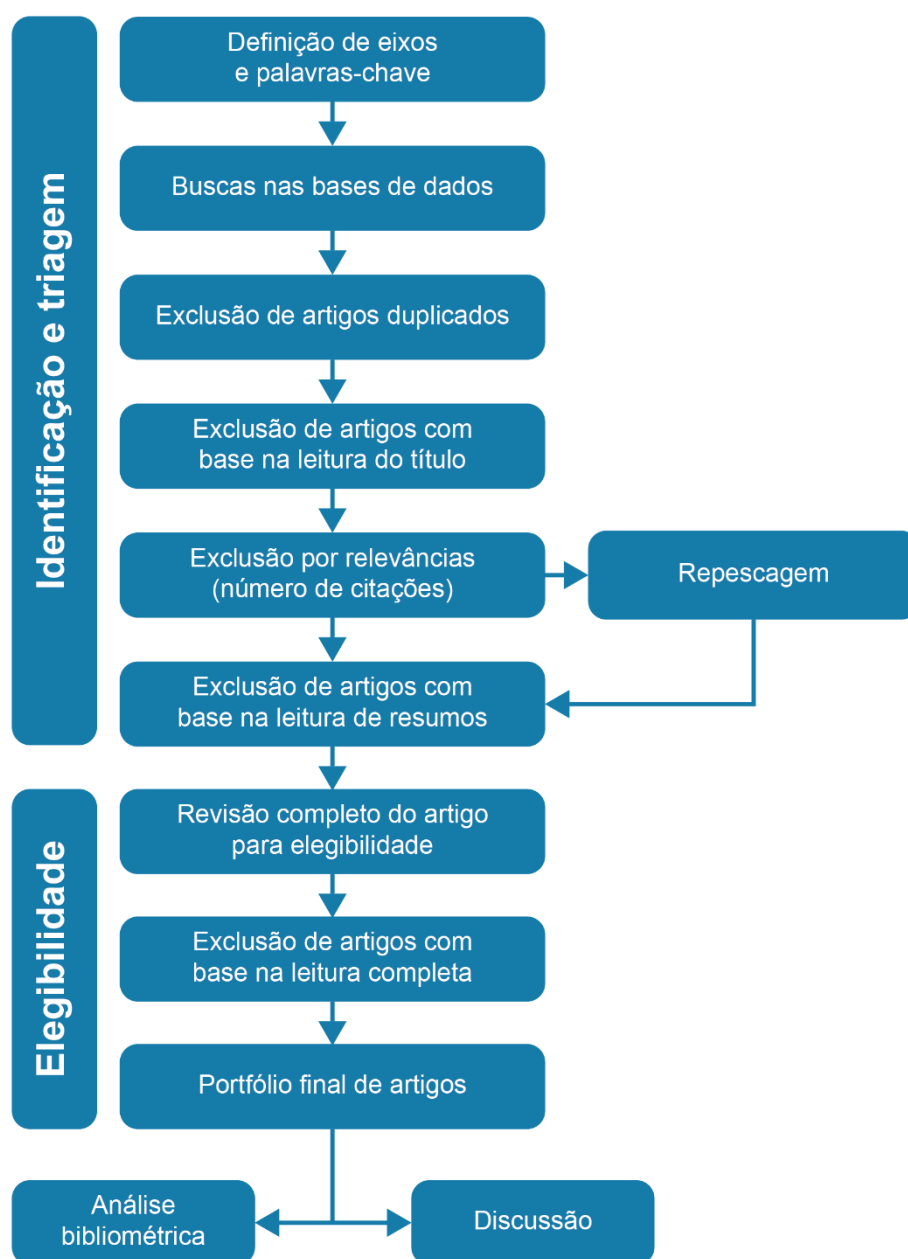


Figura 12 - Fluxograma para o processo de revisão sistemática da literatura.
 Fonte: Adaptado de Garcez (2017) , Mardani *et al.* (2016).

Na fase de identificação e triagem, tem-se como passo inicial a definição dos eixos de pesquisa, juntamente com suas respectivas palavras-chave, devendo ser relacionadas ao tema do trabalho. O primeiro eixo adotado foi 'painéis fotovoltaicos', como segundo eixo a 'reciclagem' e por fim, 'impacto ambiental' como terceiro eixo. Com isso, as palavras-chave foram definidas de acordo com o tópico abordado em cada eixo. A Tabela 3 apresenta os eixos com suas respectivas palavras-chave, com a tradução para a língua inglesa.

Tabela 3 - Eixos e Palavras-chave

Eixos	Painéis fotovoltaicos	Reciclagem	Impacto ambiental
Palavras-Chave	Energia solar (<i>solar energy</i>)	Fim de vida útil (<i>end-of-life</i>)	Resíduos (<i>leavings</i>)
	Painel fotovoltaico (<i>photovoltaic panel</i>)	Ciclo de vida (<i>life-cycle</i>)	Impacto ambiental (<i>environmental impac</i>)
	Célula fotovoltaica (<i>photovoltaic cell</i>)	Reciclagem (<i>recycling</i>)	Tóxico (<i>toxic</i>)
		Gestão (<i>management</i>)	Desperdício (<i>waste</i>)

Fonte: Autoria Própria, 2019.

As palavras-chave são o que permitem ao pesquisador realizar as buscas nas bases de dados bibliográficos e obter resultados relacionados ao seu tema de investigação. Com a utilização da tradução para língua inglesa, é possível gerar um maior número de resultados encontrados.

A partir disto, as buscas podem ser realizadas para a coleta de dados. Para aperfeiçoar as pesquisas, devem ser utilizados operadores lógicos, também chamados de operadores booleanos, entre as palavras-chave adotadas em cada eixo. Estes operadores booleanos permitem relacionar as palavras-chave de cada eixo para se obter melhores resultados, sendo eles “AND”, “OR” e “NOT”, traduzindo para a língua portuguesa tem-se “E”, “OU” e “NÃO”. O operador “AND” permite buscar todos os termos digitados, usando “OR” pelo menos um dos termos digitados será encontrado, já o operador “NOT” exclui termos digitados da pesquisa.

No caso deste trabalho, foi utilizado apenas o operador lógico “AND”, permitindo assim associar todas palavras-chave, de cada um dos três eixos, entre si. Cada uma dessas combinações forma uma *string* de buscas. As *strings* nada mais são que uma sequência de caracteres, usada para representar palavras ou frases. Para melhor compreender, a seguinte *string* “*photovoltaic panels AND recycling AND waste*”, é um exemplo de uma das utilizadas nesta pesquisa. Vale ressaltar que, palavras-chave de um mesmo eixo não são associadas pois não trazem resultados para as buscas que sejam significantes à pesquisa.

Cada uma das *strings* formada é aplicada em cada uma das três bases de dados anteriormente selecionada, permitindo assim uma coleta de dados completa. Durante a realização das buscas nas bases, deve ser feito o *download* de todos os resultados obtidos a partir de cada *string*. O *download* dos artigos é feito em formato *BibTex*, facilitando a organização da bibliografia.

Com os materiais coletados, se passa para a etapa de organização bibliográfica. Para tal é utilizado o *software Mendeley*, que permite gerenciar sistematicamente os artigos científicos disponíveis na literatura. Os arquivos *BibTex* baixados na etapa anterior são adicionados ao *Mendeley*, e assim é possível visualizar diversas informações das referências, como o nome do artigo, autores, data de publicação, resumo, entre outros.

Com todas as referências inseridas, o *software Mendeley* permite ao usuário checar os artigos duplicados. Como as mesmas *strings* foram aplicadas em todas as bases, é provável que artigos idênticos tenham sido obtidos na etapa da coleta de dados. Após catalogar todos os artigos considerados como duplicado, o *Mendeley* apresenta a similaridade entre eles, e o pesquisador pode decidir se deseja fundi-los em apenas um, facilitando as etapas seguintes da revisão sistemática.

As referências então são classificadas de acordo com o ano de publicação. Para este trabalho ficou estabelecido o período de 2009 até 2019 para seleção dos artigos. Com isso, se busca evitar a utilização de dados desatualizados no desenvolvimento da monografia. Artigos fora desse intervalo de tempo são desconsiderados.

A partir disso, a seleção dos artigos pertinentes é feita, primeiramente, a partir leitura de títulos. O tema do trabalho deve ser levado em consideração nesta etapa. O pesquisador deve julgar se o artigo se adequa com o que sua pesquisa busca responder. Os artigos que fogem ao tema devem ser excluídos.

Os artigos restantes das etapas anteriores, devem então ser classificados de acordo com sua representatividade, ou seja, em relação ao número de citações. Todas as referências são consultadas na ferramenta *Google Scholar*, onde é possível obter o número de citações. Com isso, é possível avaliar o grau de representatividade de cada referência, sendo que, quanto maior o número de citações, maior a relevância de seu conteúdo em sua área de pesquisa. Artigos com baixa representatividades são excluídos do portfólio e passam para uma fase de repescagem.

Na repescagem dos artigos de baixa representatividade, é avaliado o ano de publicação. Se estes foram publicados entre os anos de 2017 a 2019, são considerados como recentes e, devido a isto, podem ainda não ter a oportunidade

de serem citados por outros autores. Se esta condição é verificada, o artigo pode ser incluído novamente ao portfólio e passar para as próximas etapas de avaliação.

Na sequência, se passa para a leitura do resumo, onde os critérios de avaliação devem ser considerados novamente, antes da exclusão ou seleção do artigo, para que estejam alinhados ao tema da pesquisa. Em seguida, na fase de elegibilidade, é realizado o *download* dos artigos selecionados na etapa anterior, para que seja possível realizar a leitura completa de seus conteúdos. Com isso, se pode eleger os mais adequados e relevantes para cumprir os objetivos da pesquisa, compondo assim o portfólio final.

Tendo o portfólio final concluído, é possível realizar o processo de categorização dos artigos. A análise bibliométrica dos artigos selecionados, permitirá associar os resultados da revisão a partir de métodos estatísticos, tornando mais clara a apresentação dos resultados da revisão (MARDANI *et al.*, 2017). Por fim, a discussão em torno do portfólio final deve ser realizada, para considerar o que se abordaram os autores, e os resultados que foram por eles obtidos.

3.2.2 Análise Bibliométrica

Com um portfólio final definido, após as etapas apresentadas na seção 3.2.1, se pode realizar a análise bibliométrica das referências. A bibliometria é um conjunto de métodos, com os quais se consegue uma análise quantitativa de dados, para a pesquisa. Com isso, se pode analisar a estrutura de um campo científico e também investigar a dinâmica dos autores na criação de conteúdo (LEITE FILHO, 2008).

Os resultados estatísticos obtidos através da análise bibliométrica, avaliam a relevância do conteúdo científico das publicações, em determinada área do conhecimento. Auxilia na verificação de tendências e lacunas das áreas de pesquisa, avalia autores e instituições mais produtivos, e os periódicos mais utilizados na divulgação de pesquisas em determinada área científica (SOARES *et al.*, 2016).

A análise bibliométrica pode variar de acordo com o propósito do estudo. Os dados e informações a serem avaliados podem ser, o texto que compõe o artigo,

ou ainda, pode se basear nos elementos provenientes de base de dados bibliográficos, como por exemplo, nome de autores, título, fonte, idioma, palavra-chave, classificação e citações. Deste modo o pesquisador obtém uma visão estatística mais clara de suas buscas (SOARES *et al.*, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a revisão sistemática da literatura. O portfólio final definido a partir das etapas da seção anterior, uma análise bibliométrica relacionada aos artigos do portfólio e a discussão em torno dos resultados apresentados pelos autores.

4.1 RESULTADOS DA SELEÇÃO DO PORTFÓLIO

Tendo definido anteriormente as bases de busca, os eixos e as palavras-chave, foram então criadas todas as *strings* de buscas, para que o procedimento ocorresse de forma organizada. Se obteve um total de 48 *strings*. Em seguida, se deu início as buscas de cada *string* gerada com as palavras-chave, nas três bases de dados, onde após cada pesquisa, os resultados obtidos eram salvos em formato *BibTex*.

Durante o processo de busca nas bases de dados, se observou que as *strings* que continham a palavra-chave “*leavings*”, ao serem pesquisadas, não traziam nenhum resultado. Devido a isso, observou-se uma inconsistência na escolha inicial das palavras-chaves, sendo que “*leavings*” demonstrou ser uma palavra-chave inadequada ao tema da pesquisa. Foi realizada então uma revisão das palavras-chave, e foi notado que a palavra “*waste*” é um substantivo com tradução similar à de “*leavings*”, e pertencentes ao mesmo eixo. Deste modo, a palavra-chave “*leavings*” e as *strings* na qual era citada, foram todas deletadas, restando 36 *strings*. Como “*waste*” apresenta um número significativo de resultados nas buscas nas bases de dados, a pesquisa não foi prejudicada.

Após o término das buscas nas bases bibliográficas, os resultados foram inseridos no *Mendeley*. Assim, foi possível contabilizar o número de artigos obtidos a partir das buscas. A Tabela 4, a seguir, apresenta a quantidade de referências resultantes de cada base, separadamente.

Tabela 4 - Número de artigos obtidos nas bases de pesquisa.

Base de Dados	Total de Artigos
<i>Scopus</i>	1131
<i>Web of Science</i>	404
IEEE	436

Fonte: Autoria Própria, 2019.

Em seguida, se deu início a filtragem dos artigos, conforme o passo a passo apresentado no capítulo anterior. A Tabela 5, abaixo, apresenta o número total de artigos obtidos após cada uma das etapas.

Tabela 5 - Resumo da filtragem do portfólio.

Etapas	Total de Artigos
Somatório das três bases	1971
Sem artigos duplicados	1269
Leitura de títulos	131
Seleção por relevância	41
Com repescagem	56
Leitura de resumo	32
Leitura de completa	14

Fonte: Autoria Própria, 2019.

A etapa de seleção por número de citações permitiu que os artigos mais relevantes fossem elegidos, para seguir então para as etapas de leitura de resumo e texto completo. Porém, com a repescagem, quinze artigos que possuem poucas citações foram reincluídos ao portfólio, por apresentarem um conteúdo atualizado e muito relacionado ao tema de pesquisa, possuindo dados relevantes para o que se deseja discutir.

Nas etapas de leitura de títulos, resumos e da leitura completa dos artigos, alguns critérios de seleção foram considerados. Durante essas fases da filtragem, foi observado se os artigos abordavam os seguintes tópicos:

- Impactos ambientais dos resíduos de painéis fotovoltaicos;
- Políticas e normas de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos;
- Métodos e práticas atuais de reciclagem de resíduos de painéis fotovoltaicos;

Sendo que esses são os objetivos propostos deste trabalho e, ao levá-los em consideração, é possível garantir que o portfólio final da revisão sistemática aborda realmente o tema que se busca estudar na pesquisa.

Finalmente, foi realizada a leitura de resumos, e em seguida, dos textos completos. Assim, o portfólio final foi definido com um total de quatorze artigos.

Porém, com uma busca eventual realizada fora das bases de dados, um artigo publicado recentemente, neste ano de 2019, na Revista Brasileira de Energias Renováveis, intitulado “Gestão do Fim de Vida de Módulos Fotovoltaicos”, foi também incluído ao portfólio final. Essa ação não faz parte da revisão sistemática da literatura, mas, a seleção deste artigo se deu devido sua grande semelhança com o tema desta pesquisa e também por abordar o cenário Brasileiro, no quesito gestão de resíduos fotovoltaicos, em seu texto.

Finalmente, a Tabela 6 apresenta os artigos que compõem o portfólio final utilizado no desenvolvimento desta pesquisa, análise bibliométrica e discussão do portfólio final. A Tabela 6 relaciona título do artigo, autor e ano de publicação.

Tabela 6 - Portfólio final de artigos.

Nº	Título	Autor	Ano
1	<i>A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules</i>	Lunardi <i>et al.</i>	2018
2	<i>Comparative assessment of solar photovoltaic panels based on metal-derived hazardous waste, resource depletion, and toxicity potentials</i>	Bang <i>et al.</i>	2018
3	<i>Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review</i>	Salim <i>et al.</i>	2019
4	<i>End-of-life Managemant: Solar photovoltaic panels</i>	IRENA IEA-PVPS	2016
5	<i>End-of-Life Management of Photovoltaic Modules in Bangladesh</i>	Tasnia <i>et al.</i>	2018
6	<i>End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review</i>	Mahmoudi <i>et al.</i>	2019
7	<i>Environmental impact of PV cell waste scenario</i>	Bogacka <i>et al.</i>	2017
8	Gestão do Fim de Vida de Módulos Fotovoltaicos	Miranda <i>et al.</i>	2019
9	<i>Global status of recycling waste solar panels: A review</i>	Xu <i>et al.</i>	2018
10	<i>Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin film photovoltaic (PV) panels</i>	Cyrs <i>et al.</i>	2014

11	<i>Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy</i>	Sica et al.	2018
12	<i>Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy</i>	Malandrino et al.	2017
13	<i>Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules</i>	McDonald, N C Pearce, J M	2010
14	<i>Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development</i>	Padoan et al.	2019
15	<i>Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules</i>	Tao, J. Yu, S.	2015

Fonte: Autoria Própria, 2019.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Nesta seção, será realizada a análise bibliométrica dos artigos que compõe o portfólio final, apresentados anteriormente na Tabela 6. Com isso, será possível avaliar quantitativamente as referências selecionadas e analisar determinados comportamentos.

4.2.1 Relevância dos Artigos

Para analisar a relevância dos artigos, ou seja, seu reconhecimento científico, foi pesquisado o número de citações de cada um no *Google Scholar*. A Figura 13 apresenta os artigos de acordo com suas citações. Portanto, quanto maior esse número, mais relevante o artigo na área de pesquisa.

No gráfico da Figura 13, não foi inserido o nome de cada artigo, mas sim a numeração relacionada ao título de cada, de acordo com a Tabela 6, apresentada anteriormente. Deste modo, a organização e visualização do gráfico foi facilitada.

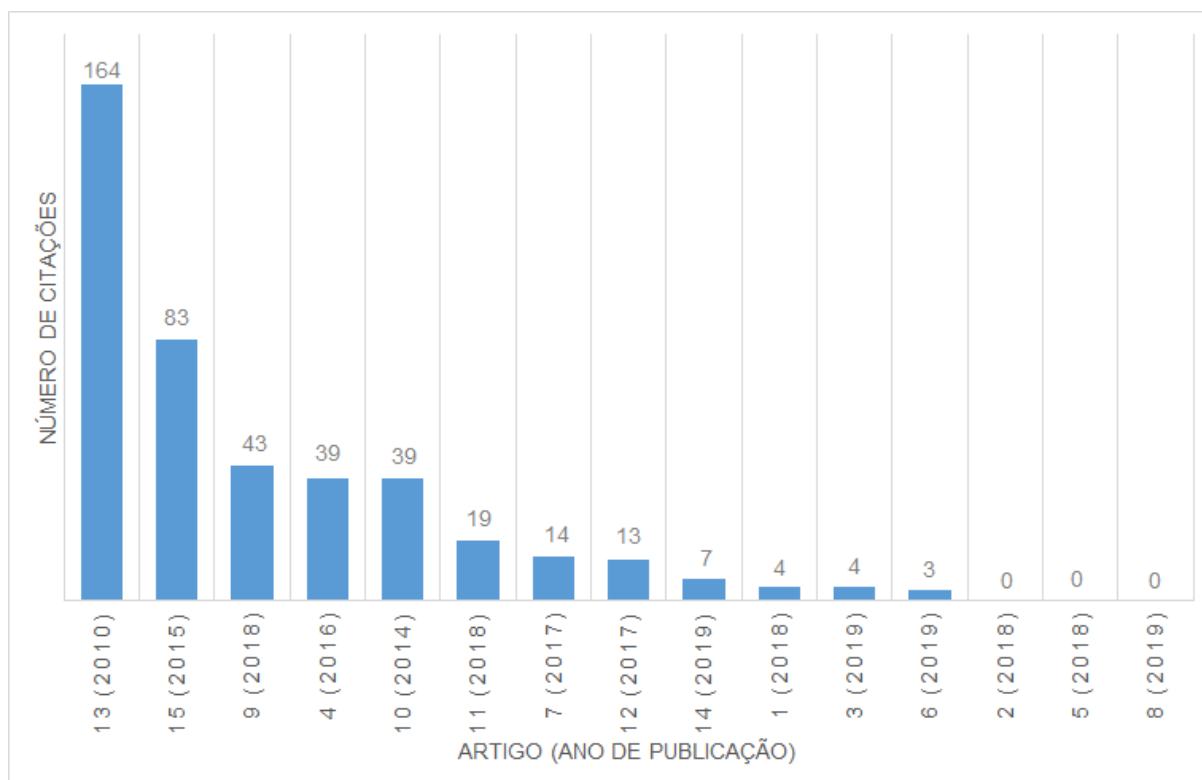


Figura 13 - Número de citações dos artigos do portfólio.
Fonte: Autoria Própria.

O artigo de maior destaque é o de McDonald e Pearce, do ano de 2010, com 164 citações. Esse elevado número de citações indica a relevância do artigo no meio da pesquisa, mas também se deve levar em conta que este já foi publicado a muitos anos. Com 83 citações o artigo de Tao e Yu, também está em segundo lugar, tendo sido publicado em mais recentemente, em 2015. O artigo que também é bastante relevante é o de Xu *et al.*, que foi publicado no ano de 2018 e já alcançou o total de 43 citações. Por fim, recebe destaque o artigo de Padoan *et al.*, que foi publicado neste ano de 2019 e já possui 7 citações feitas por outros autores.

Vale ressaltar que dentre esses artigos, estão também alguns dos que passaram pela etapa de repescagem, sendo eles recentes, e ainda com um número baixo de citações, mas com um conteúdo de muita relevância para esta pesquisa.

4.2.2 Relevância dos Periódicos

A segunda análise bibliométrica realizada, busca avaliar quais os periódicos mais utilizados pelos autores dos artigos do portfólio. Isso permite saber onde é possível encontrar mais publicações no quesito dos resíduos fotovoltaicos, ou seja, qual periódico é mais relevante de ser acompanhado pelos pesquisadores que buscam estudar este tema.

A Figura 14 apresenta todos os periódicos que publicaram os artigos que compõem o portfólio final, e o número de artigos por periódico. Na Figura 14, é possível verificar que os únicos periódicos com mais de um artigo publicado, dentre os artigos do portfólio final, foram o “*Waste Management*” e o periódico “*Energy Police*”. Com isso, é possível concluir que o tema desta pesquisa é um assunto de interesse de diversos periódicos.

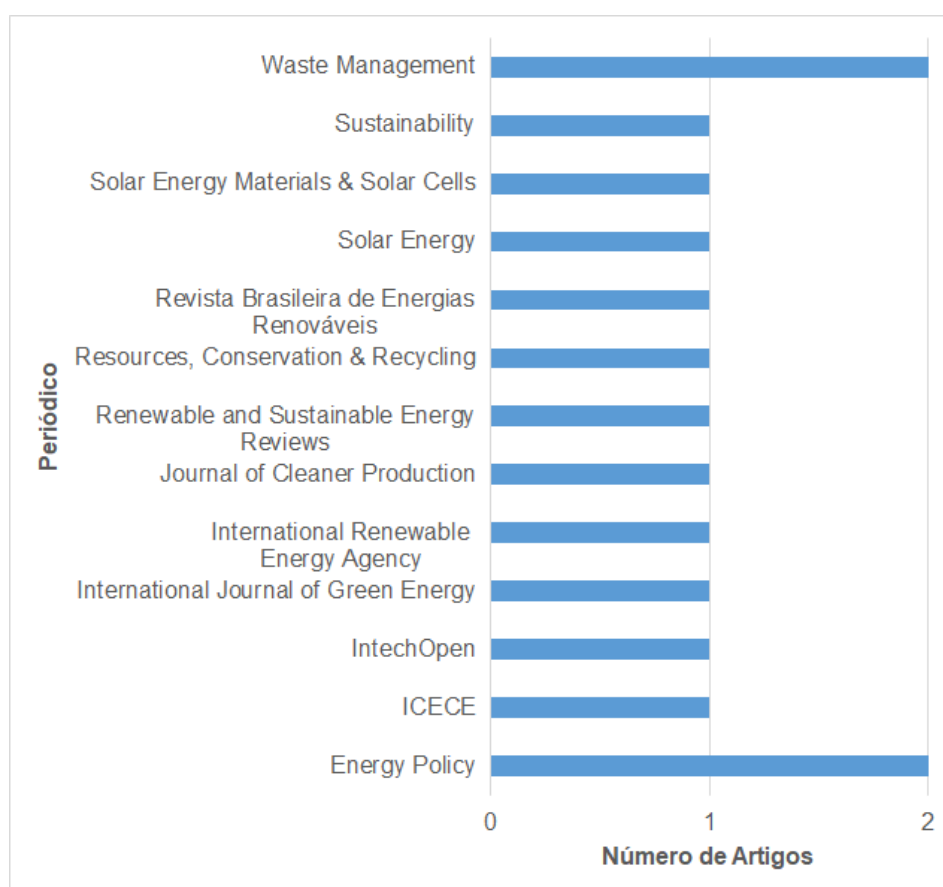


Figura 14 - Frequência dos Periódicos no portfólio final.
Fonte: Autoria Própria.

4.2.3 Incidência de Palavras-chave

O estudo da incidência de palavras-chave permite ao pesquisador verificar se os artigos de seu portfólio estão alinhados ao tema do seu trabalho. Observando as palavras-chave utilizadas pelos autores do portfólio, e comparando estas, com as palavras-chave escolhidas para o desenvolvimento desta pesquisa, é possível verificar se são similares e, portanto, concluir se a escolha das palavras foi realmente adequada para a realização das buscas.

Analisando o portfólio final, foi obtido um total de setenta e cinco palavras-chave entre os quinze artigos. A Figura 15, a seguir, apresenta as palavras-chave com maior incidência nos artigos e também algumas que possuem significado que remete ao tema deste trabalho. Demais palavras-chaves utilizadas pelos autores não foram apresentadas no gráfico pois não se relacionavam exatamente ao foco desta pesquisa, permitindo assim apresentar os resultados de forma mais compacta no gráfico.

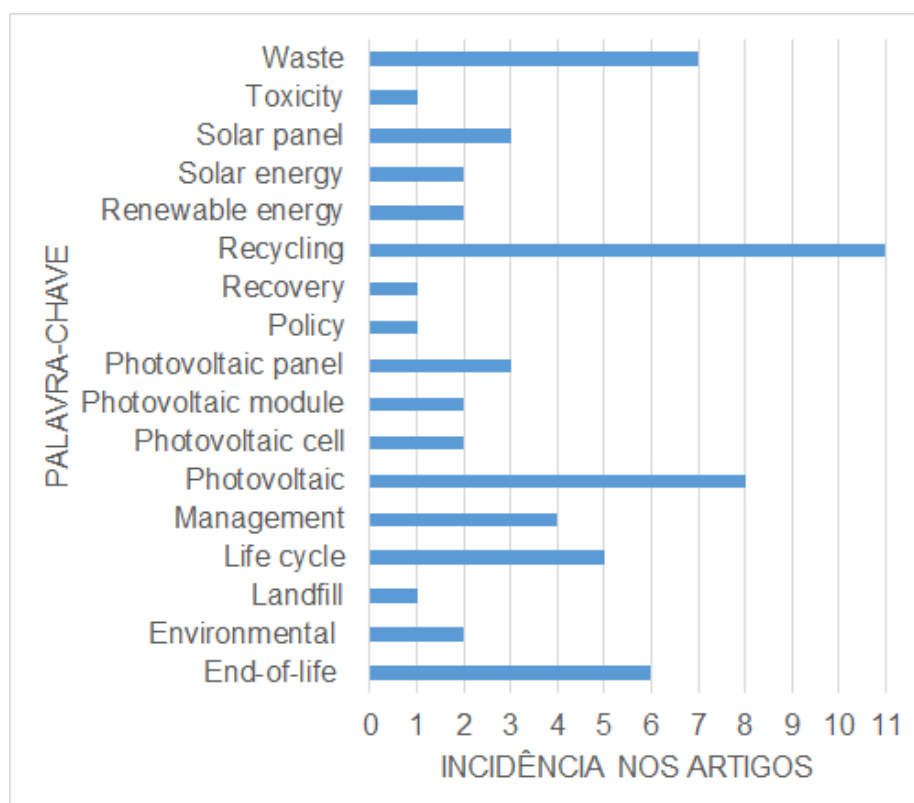


Figura 15 - Incidência das palavras-chave nos artigos.

Fonte: Autoria Própria.

Observando essas palavras-chaves, utilizadas pelos autores do portfólio, é possível notar a grande similaridade com as palavras-chave selecionadas anteriormente para realizar as buscas nas bases de dados, e também com o tema do trabalho. Assim, é possível concluir que os artigos estão alinhados com o tema desta pesquisa.

4.3 DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO

Os artigos selecionados possuem em seu conteúdo os objetivos buscados por esse trabalho. Alguns deles mais focados nas políticas internacionais de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil, outros abordam métodos de reciclagem, e alguns tratam dos impactos ambientais causados pelo descarte desses materiais. Esses artigos foram utilizados também para compor a revisão bibliográfica desse trabalho, por abordarem o tema da pesquisa.

A Tabela 7 traz de forma sintetizada o que cada autor do portfólio aborda, bem como as contribuições e considerações em torno do tema de cada um. Em seguida, nesta seção, é feita uma discussão relacionada aos tópicos que são objetivo desta pesquisa, com base no que os autores do portfólio ressaltam em seus artigos.

Tabela 7 - Análise de Conteúdo.

Autor e Ano	Proposta do Artigo	Contribuições	Conclusões
Lunardi <i>et al.</i> (2018)	Resumir possíveis processos de reciclagem de módulos solares, apresentar uma visão geral da legislação global de gerenciamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta legislação da União Europeia, Japão, EUA e Austrália. • Método <i>SolarWorld</i> (c-Si) taxa de recuperação de 90% do vidro e 95% do semicondutor. <i>First Solar</i> (CdTe) 90% do vidro e 95% do semicondutor. <i>ANTEC Solar</i> (CdTe) não apresenta taxa de recuperação. • Compara vantagens e desvantagens de novas tecnologias de reciclagem em fase pesquisa. 	Aponta os baixos volumes atuais de resíduos como bloqueio econômico para a reciclagem frente o descarte em aterro. Ressalta que a reciclagem pode garantir uma fonte de matérias-primas a longo prazo e evitar os impactos ambientais causados pelas substâncias perigosas. Não conclui qual a melhor técnica de reciclagem, indica que a melhor seria aquela que supre todas as tecnologias de painéis. Sugere a criação de legislação adequada até 2030.
Bang <i>et al.</i> (2018)	Avaliar e comparar os resíduos perigosos e o esgotamento de recursos em módulos c-Si e CIGS, usando testes de capacidade de lixiviação de metal e avaliação de impacto do ciclo de vida.	<ul style="list-style-type: none"> • Testes baseados na regulamentação federal americana. • CIGS: 2,3 mg/L para cádmio (limite 1 mg/L). • c-Si: 6,1 mg/L para chumbo (limite 5 mg/L). • c-Si tem o maior potencial de esgotamento de recursos devido principalmente à prata • CIGS tem o segundo maior potencial devido ao selênio 	Conclui que devido aos elevados potenciais de lixiviação e de esgotamento de recursos, esses painéis devem ser reciclados e gerenciados com prioridade.
Salim <i>et al.</i> (2019)	Compila e sintetiza oportunidades, barreiras e facilitadores para a gestão de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil com conceitos de economia circular.	<ul style="list-style-type: none"> • Oportunidades: econômicas, sociais e ambientais (o que incentiva as partes interessadas a realizarem o gerenciamento). • Barreiras: política e econômica, social, mercado, ambiental, infraestrutura de reciclagem (aquilo que impede a implantação do gerenciamento de resíduos fotovoltaicos). • Facilitadores: política e econômica, social, mercado, tecnologia e infraestrutura de reciclagem, comportamentais (chaves para superar as barreiras). 	Uma estrutura circular da cadeia de suprimentos do sistema de energia solar conceitual foi proposta, ilustrando como cinco categorias facilitadoras podem funcionar como um sistema interconectado que superará as barreiras para alcançar os objetivos econômicos, sociais e ambientais no gerenciamento de resíduos fotovoltaicos de painéis em fim de vida útil. Todas as oportunidades, barreiras e facilitadores são apresentadas mais claramente no texto a seguir
IRENA, IEA-PVPS (2016)	Apresentar as tecnologias e as experiências regulatórias existentes relacionadas ao gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, e mostrar oportunidades para criação de valor a partir destes resíduos, analisando	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas de gestão da Alemanha, Reino Unido, Japão, EUA, China e Índia. • Método de gestão 3R's. • Método de reciclagem para painéis c-Si: físico pode recuperar vidro, alumínio e cobre (85% da massa do painel); físico e térmico: pode 	Conclui que a experiência de gerenciamento da União Europeia pode ser tomada como exemplo, mas as políticas, que devem começar a ser discutidas agora, precisam se adequar às condições nacionais e à maturidade do setor fotovoltaico no país. Sugere-se criar uma indústria

	possíveis benefícios ambientais e econômicos com base em projeções até 2050.	recuperar o material semicondutor, não apresenta taxa de recuperação; <ul style="list-style-type: none"> • Método de reciclagem para <i>thin film</i>: método <i>First Solar</i>, 90% do vidro e 95% do semicondutor recuperados, indica que existem apenas em pequena escala devido aos baixos volumes. 	doméstica de reciclagem fotovoltaica, que integre todas as partes interessadas do setor, desde fornecedores a consumidores, pois com o aumento do fluxo de resíduos fotovoltaicos, novos mercados surgirão, trazendo oportunidades locais.
Tasnia <i>et al.</i> (2018)	Revisar os regulamentos de gestão de resíduos de painéis em fim de vida existentes no mundo, e na linha deles construir uma diretriz para Bangladesh.	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas de gestão de resíduos fotovoltaicos dos EUA, União Europeia, Alemanha Reino Unido, Itália e Japão. • Sugere a criação de centros de coleta, que devem enviar os módulos para companhias de reciclagem. Após separar os materiais (vidro, alumínio, silício, etc), sugere que sejam enviados à indústrias que façam uso em seus processos produtivos. Os materiais que não puderem ser recuperados devem ser descartados de forma adequada. 	O autor conclui que a gestão adequada de resíduos fotovoltaicos pode desbloquear um estoque de matérias-primas. A gestão e a reciclagem podem também proteger o meio ambiente de ser poluído pelos resíduos e criar valor econômico para o país. O autor sugere ainda que, após ter uma estrutura estabelecida, as fronteiras sejam abertas para que países vizinhos que não possuem centros de recuperação enviem seus painéis desativados para que sejam reciclados em Bangladesh.
Mahmoudi <i>et al.</i> (2019)	Investigar sistematicamente pesquisas globais sobre os módulos fotovoltaicos em fim de vida útil para identificar as lacunas para uma maior exploração.	<ul style="list-style-type: none"> • Lista das 76 patentes registradas de processos de reciclagem e métodos de recuperação de resíduos fotovoltaicos (Apresentada no Anexo A). • Revela que a maioria das pesquisas de reciclagem é realizada em escala laboratorial e que ainda há muitos países que não estimaram seu fluxo de resíduos e não desenvolveram a infraestruturas de reciclagem. 	Sugere que cada país realize previsão dos fluxos de resíduos para desenvolver suas próprias políticas de gestão de resíduos. E também que pesquisas sejam realizadas focadas no desenvolvimento de tecnologias de reciclagem avaliando os impactos ambientais dos processos.
Bogacka <i>et al.</i> (2017)	Avaliar os impactos ambientais da reciclagem de painéis fotovoltaicos, com base na avaliação do ciclo de vida usando dados médios de bancos de dados para células c-Si, para verificar se é viável. A análise do cenário do ciclo de vida das células foi realizada usando o software SIMA PRO e os dados do banco de dados Ecoinvent 3.0.	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto ambiental de 1 módulo fotovoltaico em 3 etapas (produção, transporte e reciclagem) em 3 categorias principais de impacto (saúde humana, ecossistemas e recursos). • Considerou taxa de recuperação de 90% para cobre, vidro e silício e 100% para alumínio. Não considerou o consumo energético. • O impacto ambiental da reciclagem é baixo frente ao causado na produção do módulo. 	A produção de painéis fotovoltaicos envolve o uso de substâncias e emissões químicas, assim não podemos considerar a energia fotovoltaica como uma tecnologia de emissão zero. Concluiu que o alívio ambiental causado pela recuperação de matérias-primas obtido com a reciclagem é bastante pequeno, e se levado em consideração o consumo energético, o alívio ambiental gerado pela reciclagem reduz ainda mais.
Miranda <i>et al.</i> (2019)	Apresentar como alguns países e o Brasil estão se preparando para	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas de gestão da União Europeia, Alemanha, Reino Unido, Japão, EUA, China, 	Conclui que o problema ganhará destaque em 2030, mas o debate da criação de políticas deve

	lidar com o crescente volume de resíduos fotovoltaicos e também algumas regulamentações e estratégias já existentes em relação à gestão do fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos.	<p>Coréia e Índia.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estratégia de gestão 3R's. • Brasil: não possui lei específica para painéis descartados, mas se classifica como REEE e é regulamentado pela Lei nº 12.305/2010, mas não possui fiscalização adequada. • Projetos de gerenciamento: <i>CU-PV</i>, <i>PV Cycle</i>, <i>First Solar</i>, <i>FRELP</i>, <i>SolarWorld</i>. 	ser iniciado desde já pois são processos longos e demorados. Aponta a reciclagem como uma forma de reduzir o impacto causado pelos materiais perigosos e de se reaproveitar matéria prima, reduzindo o consumo energético. Indica que sem incentivo fiscal e financeiro adequados a reciclagem se encontra em posição desfavorável frente ao aterro.
Xu <i>et al.</i> (2018)	Fornecer uma base para apoiar a reciclagem de painéis fotovoltaicos e sugerir direções futuras para os formuladores de políticas públicas na China.	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas de gestão da União Europeia, Alemanha, Reino Unido, PV Cycle Japão, EUA e China. • Apresenta e compara vantagens e desvantagens de tecnologias de reciclagem comerciais e em fase de pesquisa (não apresenta as taxas de recuperação de materiais). 	O autor sugere a criação de políticas que incentivem a reciclagem, estendendo a responsabilidade de tais processos aos fabricantes, que também devem ser obrigados a divulgar informações ambientais relacionadas aos módulos. Indica também que uma penalidade pode ser aplicada pelo descarte inadequado de resíduos de painéis.
Cyrs <i>et al.</i> (2014)	Avaliar o potencial risco à saúde humana devido à lixiviação de cádmio dos painéis fotovoltaicos de telureto de cádmio (CdTe) dispostos em aterro sanitário.	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de lixiviação indicando concentração de até 9,5 mg/L, excedendo limites regulamentares americanos de 1 mg/L. • Avaliação se um único aterro pode absorver resíduos de CdTe para causar risco a saúde: disposição de 1900 m³ (volume crítico para limite 1 mg/L), considerado cenário improvável, pois o aterro teria que receber mais de 4% do total de resíduos CdTe gerados dos volumes de produção dos EUA em 2014 todos os anos por 20 anos. 	Com base nas estimativas de risco à saúde humana geradas para descarte de painéis fotovoltaicos, a avaliação indicou que o descarte de painéis de CdTe em aterros sanitários não representa um risco à saúde humana, nos volumes de produção consideradas, analisando aterros com forro. A medida que o uso da tecnologia aumentar essa avaliação também deve mudar.
Sica <i>et al.</i> (2018)	Analisar a implementação dos conceitos de uma economia circular de ciclo fechado para o gerenciamento de resíduos de painéis fotovoltaicos me fim de vida útil.	<ul style="list-style-type: none"> • Reciclagem para módulo c-Si (<i>SolarWorld</i>): vidro, Si, Al, EVA e Ag podem atingir taxas de recuperação 89%, 80%, 81%, 80% e 89%, respectivamente (os materiais reciclados são vidro 42,3 kg; Al 10,3 kg; EVA 12,47 kg; Ag 0,024 kg; Si 2 kg por módulo de 1 kW). • Reciclagem para módulo CdTe (<i>First Solar</i>): recuperação 90% do vidro e 95% do semicondutor. O método está sendo testado nos módulos CIGS. • Apresenta estimativa dos custos relacionados a 	Conclui que o setor pode ser um dos maiores contribuintes para moldar a economia circular, indicando que a cada 100 painéis usados reciclados pode se obter 42 novos painéis. Sugere que políticas para gerenciamento destes resíduos devem fortalecer o mercado regional de reciclagem, necessitando de uma estrutura financeira e da colaboração da comunidade empresarial, do governo e de instituições para que possam alcançar a sustentabilidade.

		poluição causada pela lixiviação do chumbo (2 bilhões de dólares) e cádmio (15 milhões de dólares) em 2050.	
Malandrino <i>et al.</i> (2017)	Revisar as iniciativas mais importantes tomadas a nível nacional para a gestão de fim de vida dos módulos, e destacar questões associadas à eliminação ou reciclagem de painéis fotovoltaicos obsoletos na Itália.	<ul style="list-style-type: none"> • Criação de valor com a reciclagem de metais raros com base nas estimativas de descarte e preço na Itália em 2050, equivalem a 130 milhões de euros em índio, 1 bilhão de euros de prata, 21 milhões de euros de germânio e quase 2 bilhões de euros de gálio. • Apresenta as consequências ambientais e na saúde humana causadas pelos materiais tóxicos cádmio e chumbo. • Legislação italiana distingue a responsabilidade da gestão do resíduo entre proprietário para painéis antigos e do fabricante para instalados a partir de 2014. 	Os resultados apontam para a importância de uma economia circular, através da participação de todos os envolvidos, a fim de tornar o ciclo de vida fotovoltaico mais verde. Atualmente na Itália a reciclagem dos módulos não recupera materiais como o cobre, prata, estanho, chumbo e silício. Assim o autor sugere que se compartilhem tecnologias industriais, para que a recuperação total de componentes e de peças perigosas seja alcançada, trabalhando para que uma reciclagem com impacto ambiental desprezível seja alcançada.
McDonald; Pearce (2010)	Examinar a necessidade potencial de políticas de reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim de vida. O potencial de lucro da reciclagem é determinado. O custo da disposição de aterros sanitários de todo o módulo solar, incluindo o vidro e o semicondutor, também foi determinado para cada tipo de módulo solar.	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta as iniciativas de reciclagem <i>First Solar, SolarWorld Global and PV Cycle</i>. • Realiza os cálculos para verificar se a reciclagem de vários tipos de painéis é lucrativa. A rentabilidade foi calculada como a soma dos lucros da revenda de materiais de vidro e semicondutores e o custo de disposição em aterro sanitário, menos o custo de reciclagem. Os materiais semicondutores considerados são: índio (In), gálio (Ga), silício (Si), sulfeto de cádmio (CdS), cádmio (Cd) e telúrio (Te). • Aponta o único com reciclagem lucrativa o CIGS, pelo lucro obtido com a revenda de In e Ga recuperados. • Os valores utilizados pelo autor foram obtidos com base na literatura. O texto a seguir detalha esses resultados. 	Verificou-se que a motivação econômica para reciclar a maioria dos tipos de dispositivos fotovoltaicos não supera a diferença entre custos de reciclagem e aterro, tornando a reciclagem uma opção econômica desfavorável sem incentivos e políticas adequadas. No entanto, afirma que é fundamental que a regulamentação da reciclagem na fabricação de energia fotovoltaica não eleve o custo dos módulos a ponto de fornecer uma vantagem competitiva para as formas mais destrutivas do ambiente de produção de eletricidade. Portanto, é imperativo que políticas apropriadas sejam instituídas, levando em consideração o futuro e minimizando a poluição ambiental e os resíduos sólidos da produção de eletricidade.
Padoan <i>et al.</i> (2019)	Apresentar processos para reciclar painéis fotovoltaicos. Revisar a legislação atualmente em vigor para regulamentar o gerenciamento de painéis fotovoltaicos em fim de	<ul style="list-style-type: none"> • Legislação da União Europeia, <i>PV Cycle</i> e China. • Processo físico de reciclagem: barato, mas não permite recuperar metais de alto valor, apenas vidro e alumínio, requer tratamentos adicionais. 	Mesmo considerando os aspectos negativos gerados pela reciclagem de painéis fotovoltaicos, como os reagentes e as emissões de gases, esses processos ainda são convenientes e podem ser remediados com filtros de emissão de gases,

	vida.	<ul style="list-style-type: none"> • Processo térmico: usa altas temperaturas para decompor o EVA permitindo recuperar mais de 90% dos componentes do painel, exige alto consumo de energia. Aponta recuperação de vidro, alumínio, chumbo e célula solar para painel s-Ci. • Processo químico: necessita um pré-tratamento (físico ou térmico) e utiliza reagentes nocivos, gera grandes quantidades volumes de resíduos líquidos. Permite recuperar vidro, cádmio e telúrio dos módulos CdTe; recuperar vidro cobre, índio, gálio e selênio dos CIGS. 	reutilização de reagentes e tratamento de águas residuais. O gasto de energia em um processo de reciclagem é menor do que o gasto na fabricação de um novo painel. A pesquisa sobre técnicas de recuperação está em constante desenvolvimento, buscado um processo que permite o tratamento de todas as tipologias.
Tao; Yu (2015)	Avaliar tecnologias de reciclagem de resíduos de painéis fotovoltaicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Método <i>SolarWorld</i> painel c-Si: recuperação de mais de 90% de vidro e 95% de semicondutor (Si) e mais de 97% se a bolacha estiver intacta. • Método <i>First Solar</i> módulo <i>thin film</i>: 90% do vidro e 95% do semicondutor (Cd, Te). • Método <i>ANTEC Solar</i> módulo <i>thin film</i> CdTe: taxas de recuperação não apresentadas. • Apresenta vantagens e desvantagens de métodos de reciclagem comerciais e de novos métodos. 	Os resultados mostram que as tecnologias de reciclagem para módulos em fim de vida são amplamente exploradas e algumas estão disponíveis comercialmente, embora ainda existam desafios na eficiência do processo, redução na complexidade do processo, requisitos de energia e uso de produtos químicos. A elaboração de um design de fácil desmontagem pode melhorar a reutilização de componentes valiosos. Verificou-se também que, embora estudos demonstrem que a reciclagem tenha impactos positivos significativos na redução de cargas ambientais, a viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda é desfavorável e são necessárias políticas para incentivar a responsabilidade do produtor, e uma rede de coleta eficiente deve ser importante para a viabilidade econômica dos negócios de reciclagem de módulos fotovoltaicos.

Fonte: Autoria Própria.

O rápido crescimento do número de painéis fotovoltaicos instalados em todo o mundo acarretará em um aumento drástico dos volumes de módulos em fim de vida útil nas próximas décadas. Como apontado no Capítulo 1, é esperado que esses resíduos comecem a atingir volumes significativos por volta de 2030, podendo chegar até 78 milhões de toneladas métricas no ano de 2050. O descarte inadequado de todos esses painéis pode trazer efeitos prejudiciais para o meio ambiente e também para a saúde humana, pois contém metais perigosos, como o cádmio e chumbo, que, apesar de comporem uma pequena parte da massa do painel, segundo testes, excedem os níveis de lixiviação.

Segundo a avaliação de Cyrs *et al.* (2014), o descarte de módulos de *thin film* CdTe, em aterros sanitários, apresenta um risco remoto a saúde humana e ao meio ambiente por lixiviação atualmente, devido à baixa taxa de utilização e descarte desta tecnologia. Em sua análise, o autor considera ainda apenas aterros com forro íntegro, mas o risco de que pessoas realizem o descarte em lixões inadequadamente não pode ser desconsiderado. Entretanto, o autor destaca que os riscos de contaminação dependem do volume de descarte de painéis, que apresenta tendências de crescimento, tornando evidente a necessidade da execução de um manejo adequado destes resíduos, para evitar os danos ao meio ambiente.

Para Bang *et al.* (2018), os módulos fotovoltaico c-Si e CIGS, apresentam níveis de toxicidade comparáveis entre si, embora esses potenciais fossem diferentes, pois o primeiro se relaciona ao chumbo e o segundo ao cádmio. Ambos podem trazer efeitos adversos ao meio ambiente e a saúde humana, em caso de contaminação da água, criando uma cadeia de efeitos negativos. Porém, como abordado na Tabela 1, no Capítulo 2 desta monografia, os painéis a base de silício compõem um número mais expressivo no mercado, frente aos módulos CIGS, e aos CdTe também. Isso implica, que os potenciais riscos ambientais são maiores para os painéis c-Si, e estes devem ser gerenciados com prioridade.

Uma forma de se reduzir os impactos causados ao meio ambiente pelos resíduos fotovoltaicos é a partir da reciclagem. Conforme observados nos artigos do portfólio e abordado anteriormente neste trabalho, os procedimentos de reciclagem apresentam taxas de recuperação de em média 90% para o vidro, 100% para o alumínio utilizado na estrutura externa do módulo, e 95% para o material semicondutor. De acordo com Padoan *et al.* (2019), recentes métodos de reciclagem patenteados já conseguem atingir taxas de recuperação do semicondutor em torno

de 97% de toda sua massa presente nos painéis. Observou-se que é possível recuperar materiais como silício, prata, chumbo, cobre, selênio índio, gálio, cádmio e telúrio.

Métodos de reciclagem vem sendo pesquisados em todo mundo, porém, poucos já são aplicados em escala comercial, devido a longa vida útil dos módulos e o baixo volume atual de resíduos, o que inviabiliza economicamente sua aplicação em grande escala.

Além disso, vários estudos avaliam os impactos ambientais causados pelos métodos de reciclagem. Este é um tema ainda controverso, pois existem vantagens e desvantagens associadas a cada processo, envolvendo todas as etapas dos métodos de reciclagem.

O processo mecânico de reciclagem tem a vantagem do baixo custo, porém não conseguem recuperar materiais de alto valor, nem os elementos tóxicos, e desta forma é necessária a aplicação de procedimentos complementares. Os métodos térmicos, por sua vez demandam um alto consumo energético para serem executado. A literatura não tem abordado a recuperação desta energia de combustão, devido a emissão de gases tóxicos gerados no processo, como o flúor. Deste modo, processos térmicos ainda precisam ser mais bem desenvolvidos para alcançar a sustentabilidade ambiental e econômica. No caso dos processos químicos, o foco principal é a recuperação de metais, fazendo uso de solventes e reagentes. Sua aplicação demanda maiores custos, porém tem como vantagem o grau de pureza obtido dos metais recuperados. Para reduzir os impactos ambientais e econômicos desse processo químico, é necessário o desenvolvimento de processos que permitam a regeneração dos solventes utilizados (PADOAN *et al.*, 2019).

O estudo realizado por Bogacka *et al.* (2017) apontou os impactos ambientais causados pela reciclagem e fabricação de um módulo de silício a partir da análise do ciclo de vida. Os resultados são apresentados nas categorias saúde humana, ecossistema e recursos, expressos em pontos ambientais (Pt), conforme mostra a Figura 16. Segundo o autor, os impactos ambientais causados pela reciclagem são baixos, frente aos impactos gerados pela produção do módulo. No entanto, ele afirma que a recuperação dos materiais pelos processos de reciclagem atuais é baixa, e se fosse levado em conta o consumo de energia necessário para

executar o processo, pode reduzir ainda mais o alívio ambiental gerado pela reciclagem, que para o autor, já era considerado como insignificante.

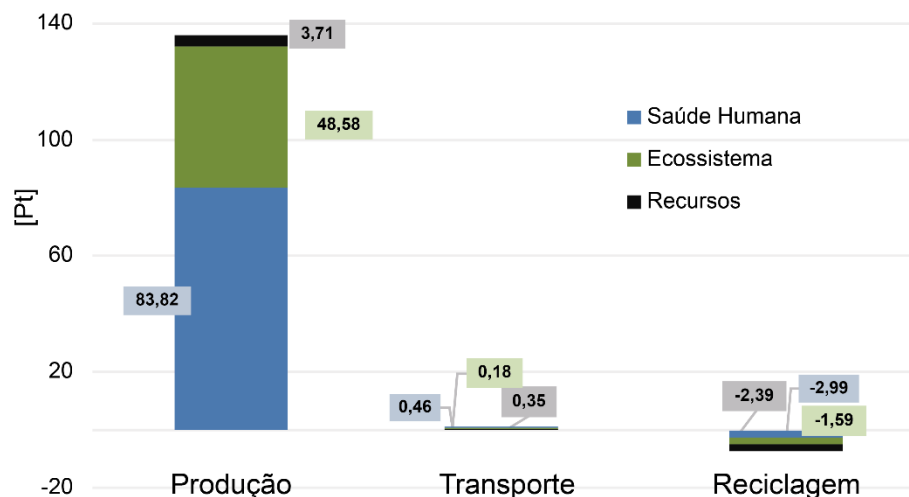


Figura 16 - Impacto ambiental de um módulo fotovoltaico c-Si em três etapas.
Fonte: Adaptado de Bogacka et al. (2017).

Porém, Padoan *et al.* (2019) ressalta que, mesmo levando em conta os pontos negativos causados pelos métodos de reciclagem dos painéis fotovoltaicos, como o gasto de reagentes e as emissões de gases, esses processos ainda são válidos. Esses problemas podem ser atenuados com a reutilização dos reagentes, com filtros de emissão de gases e com o tratamento de águas residuais dos processos. Outros autores ainda apontam os demais benefícios ambientais trazidos pela reciclagem dos resíduos fotovoltaicos.

De acordo com Lunardi *et al.* (2018), a reciclagem dos painéis c-Si tem impactos ambientais inferiores do que a disposição destes resíduos em aterros sanitários, assumindo que os recursos reciclados retornem à fabricação de células e módulos fotovoltaicos. Pois a reutilização destes recursos traz uma redução nos impactos potenciais do aquecimento global de até 20%, frente a fabricação das células com matérias novas retirados da natureza. Sica *et al.* (2018), exemplifica essas vantagens, apontando que a reciclagem de 185 t de módulos c-Si de uma estação com uma potência instalada de 2,46 MW, permite uma economia de cerca de até 2.220 t CO₂eq⁵. Esse valor, somado ao benefício ambiental da utilização da energia solar para geração de eletricidade, trazem uma redução de

⁵ Equivalência em dióxido de carbono (CO₂eq): medida internacional que indica a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono.

aproximadamente 49.470 t CO₂eq ao longo da vida útil da estação, que gira em torno de 20 anos.

Outra vantagem ambiental da reciclagem dos resíduos fotovoltaicos é a redução do consumo de energia. Como abordado nos capítulos anteriores, métodos de reciclagem conseguem alcançar taxas de recuperação relativamente alta dos componentes, que podem ser utilizados na fabricação de novos painéis. Segundo Miranda *et al.* (2019), para produzir os módulos utilizando estes materiais recuperados pela reciclagem, é necessário apenas 30% de toda a energia que seria necessária para fabricar módulos novos com matéria prima retirada diretamente da natureza.

Além das vantagens ambientais trazidas pela reutilização de materiais reciclados na fabricação de novos módulos, um importante valor econômico pode ser criado extraindo matéria-prima secundária dos painéis fotovoltaicos em fim de vida. De acordo com IRENA e IEA-PVPS (2016), com sua vida útil média longa, os painéis fotovoltaicos acumularão um grande estoque de matérias-primas. A Figura 17, mostra o potencial de materiais que podem ser recuperados a partir da reciclagem de painéis em fim de vida até o ano de 2030. Os autores consideraram que as matérias-primas são recicladas com uma taxa de 70% em massa, e não levaram em conta os polímeros não recicláveis.

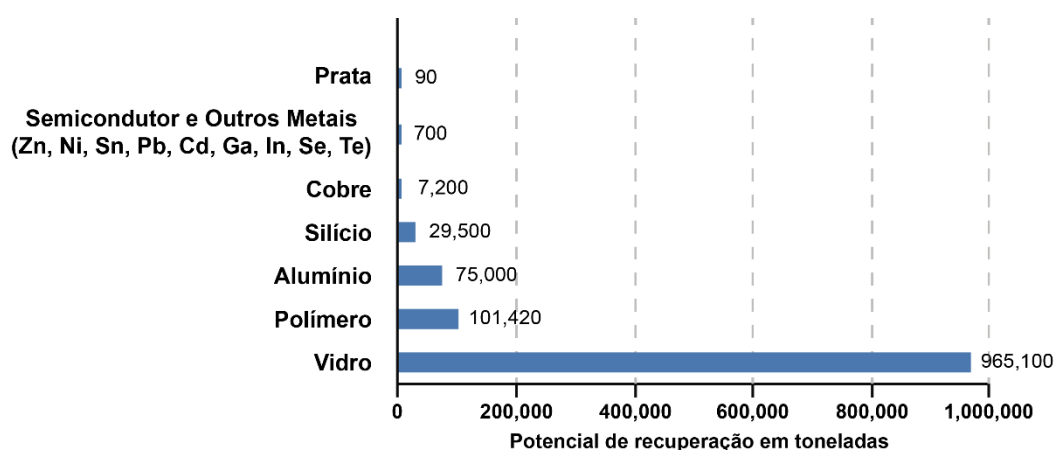


Figura 17 - Potencial de recuperação em fim de vida no cenário de perdas regulares para 2030 expressos em toneladas.

Fonte: Adaptado de IRENA e IEA-PVPS (2016).

Mais de 80% da massa de todas as tecnologias fotovoltaicas é composta por vidro, desta forma ele apresenta a maior quantidade de material recuperável, com um potencial valor em torno 28 milhões de dólares. Apesar de os demais

materiais apresentarem menores quantidades frente ao vidro, seu valor agregado é bem mais representativo, como por exemplo, para as 30.000 t de silício equivalem cerca de 380 milhões de dólares, sendo ainda mais expressivo para a prata, onde as 90 toneladas equivalem em torno de 50 milhões de dólares.

Esses valores indicam que o setor de resíduos fotovoltaico tem forte potencial para criar uma economia circular, onde os volumes de materiais recuperados podem ser utilizados na fabricação de novos módulos, amenizando a extração e depleção de materiais do meio ambiente. Conforme representado na Figura 18, o estudo realizado por IRENA e IEA-PVPS (2016), revelou ainda que o valor total potencial do material recuperado por meio de tratamento e reciclagem de painéis fotovoltaicos chega a 450 milhões de dólares até 2030, e isso equivale ao valor atual da matéria-prima necessária para produzir 60 milhões de novos painéis. Aplicando o mesmo cenário para 2050, o potencial de valor das matérias-primas desbloqueadas pela reciclagem deverá ultrapassar os 15 bilhões de dólares, equivalente à matéria-prima necessária para produzir 2 bilhões de novos painéis.



Figura 18 - Criação de valor potencial por meio do gerenciamento de módulos fotovoltaicos em fim de vida até 2030 e 2050.

Fonte: Adaptado de IRENA e IEA-PVPS (2016).

No entanto, atualmente os volumes de resíduos ainda são muito baixos e os custos dos módulos de reciclagem são mais altos que o valor dos materiais recuperados, sendo um empecilho para que a reciclagem se estabelecer desde já no mercado. O estudo realizado por McDonald e Pearce (2010), avalia a rentabilidade

da reciclagem das principais tecnologias fotovoltaicas, para 1 m² de cada módulo. A rentabilidade total foi calculada como a soma dos lucros da revenda de materiais de vidro e semicondutores (P_t) e o custo de disposição em aterro sanitário (D), menos o custo de reciclagem (C). Os resultados obtidos, em dólares, são mostrados na Tabela 8, onde se observa que o custo de disposição dos módulos CdTe é mais elevado por conter uma quantidade mais elevada de cádmio, porém o sulfeto de cádmio presente na camada de bloqueio do painel CIGS não foi levado em consideração no cálculo do custo de sua disposição.

Tabela 8 - Rentabilidade da reciclagem dos painéis fotovoltaicos.

	CIGS	CdTe	c-Si
P_t (\$/módulo)	41,62	2,31	7,54
C (\$/módulo)	20,24	9,00	32,11
D (\$)	0,87	6,45	0,61
$P_T = P_t + D - C$	22,25	-0,24	-23,96

Fonte: Adaptado de McDonald e Pearce (2010).

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que a motivação econômica para reciclar a maioria dos tipos de dispositivos fotovoltaicos é desfavorável. Segundo Tao e Yu (2015), os módulos do CIGS serão reciclado devido ao valor dos materiais que eles contêm, mas para os outros módulos é necessária a criação de políticas ambientais apropriadas. Pois a menos que a reciclagem de módulos solares seja regulamentada, no futuro toneladas de materiais tóxicos e demais resíduos sólidos podem ser descartados incorretamente, poluindo o meio ambiente. Miranda *et al.* (2019) destaca ainda que a falta da adoção de políticas de gestão e controle desses resíduos, pode acarretar no descarte em lixões, ou ainda no transporte ilegal destes volumes para países subdesenvolvidos.

Algumas ressalvas podem ser levantadas em relação a esses aspectos econômicos da reciclagem levando em conta as perspectivas futuras e novos métodos de reciclagem. Padoan *et al.* (2019), realizou uma avaliação de processos patenteados com taxas de recuperação maiores que 97%, com preços de mercado dos materiais reciclados baseada em dados de referência relatados para o primeiro semestre de 2018, ressaltando que os preços flutuaram significativamente desde 2010. O autor apontou que o potencial econômico dos processos de reciclagem propostos para o CIGS e o CdTe são semelhantes, embora os preços do In e Ga (encontrados no CIGS) sejam muito maiores do que os encontrados para o Cd e Te

(encontrado no CdTe). Isso ocorre devido às concentrações muito baixas de In e Ga nos painéis do CIGS. Vale destacar que os processos de reciclagem não retornam materiais com totalmente puros, de modo que os resultados podem ser bastante variados dependendo do método de recuperação aplicado. O autor não apontou os custos envolvidos nos processos de reciclagem.

Além disso, de acordo com Sica *et al.* (2018), em 2050, o descarte indevido de 2151 t de chumbo, (lixiviação média de 1741,2 t) e 877 t de cádmio (lixiviação média de 302,5 t), dos painéis fotovoltaicos em fim de vida, acarrete em um custo de mais de 2 bilhões de dólares e cerca de 15 milhões de dólares, respectivamente, para a remoção destes metais perigosos dos aterros sanitários. Para Miranda *et al.* (2019), este custo da poluição causada pela lixiviação de materiais que contém chumbo e cádmio anularia os benefícios da economia gerada pela energia fotovoltaica ao longo de sua vida útil. Além disso, os lucros considerados na Tabela 7, obtidos pela revenda dos materiais reciclados, levam em conta apenas vidro e semicondutores, mas como abordado anteriormente, existem demais materiais com muito valor agregado que podem ser desbloqueados pela reciclagem para serem então revendidos e reutilizados.

Até o presente momento, os métodos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos em fim de vida não se mostraram tão atrativos economicamente frente ao descarte em aterro, mas para Mahmoudi *et al.* (2019), atingir um volume considerável de resíduos fotovoltaicos é necessário para se obter a viabilidade da reciclagem de resíduos fotovoltaicos. Esses processos podem garantir a sustentabilidade da cadeia de suprimentos a longo prazo, gerando uma forma recuperação de energia e de materiais, reduzindo as emissões de CO₂, para fabricação de novos módulos. Logo, a baixa rentabilidade não implica que a possibilidade da reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida deve ser descartada, pois as pesquisas sobre técnicas de recuperação desses resíduos estão em constante desenvolvimento. A gestão de resíduos fotovoltaicos tem o potencial de abrir novos caminhos para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica a partir de uma economia circular, ainda oferece possibilidades de investimentos e de criação de empregos (LUNARDI *et al.*, 2018; PADOAN *et al.*, 2019; TAO; YU, 2015).

Para a aplicação de economia circular é essencial a realização de mudanças nas cadeias de valor, desde a produção, consumo e descarte de painéis fotovoltaicos, transformando resíduos em recursos, e desenvolvendo novos modos

de comportamento do consumidor, ou seja, os desafios são vários (SICA *et al.*, 2018). O estudo de Salim *et al.* (2019) aborda as atuais barreiras e fatores facilitadores para a implementação do gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, que permita o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos circular, conforme a estrutura conceitual mostrada na Figura 19. As barreiras que impedem essa prática são classificadas em cinco categorias interconectadas: política e econômica, mercado, social, ambiental e infraestrutura de reciclagem. Os cinco fatores facilitadores interconectados buscam superar as barreiras, alcançando as principais oportunidades, que são todos os benefícios trazidos pela cadeia circular de gestão de resíduos, sendo eles divididos em oportunidades econômicas, sociais e ambientais.

Para o autor, superação dessas barreiras, citadas na Figura 19, não é uma tarefa fácil. Alcançar o sucesso do gerenciamento de painéis em fim de vida depende da participação e do comprometimento de todas os setores envolvidos ao longo da cadeia de suprimentos. Debates para criação de políticas devem ser realizados entre todas as partes, buscando desenvolver os fatores facilitadores de forma que fiquem alinhados seus interesses particulares, como por exemplo, investimento do governo, lucro da recicladora, número de produtos reciclados, criação de empregos, entre diversos outros fatores.

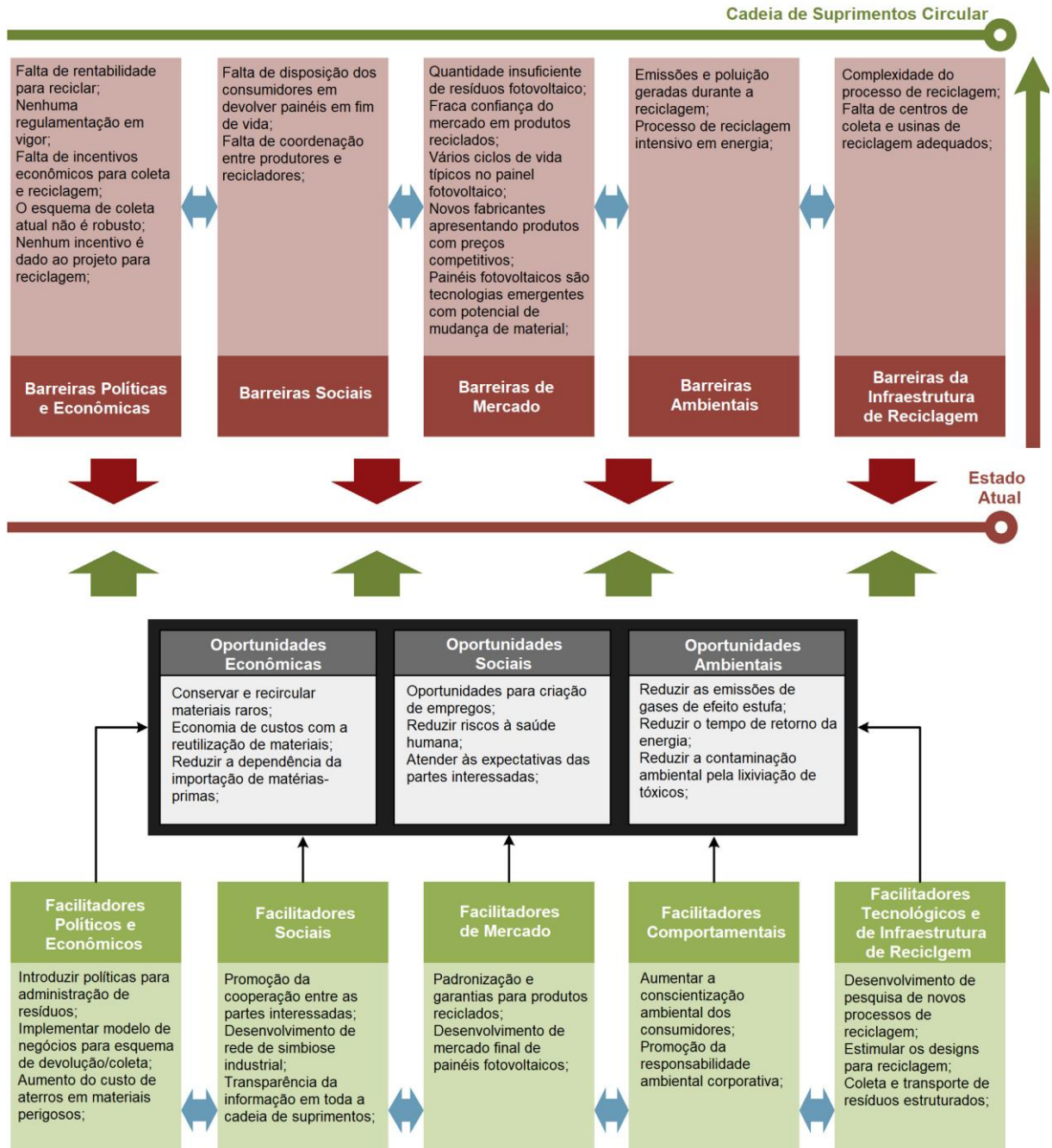


Figura 19 - Estrutura conceitual para a cadeia de suprimentos circular do sistema de energia solar fotovoltaica.

Fonte: Adaptado de Salim *et al.* (2019).

Todas as questões ambientais e econômicas apontadas nessa monografia, em relação aos painéis fotovoltaicos em fim de vida, indicam para a necessidade da criação de políticas para realizar o gerenciamento desses resíduos. Essas preocupações virão à tona apenas nas próximas décadas, quando os volumes começarem a se tornar expressivos. Porém, a elaboração e o estabelecimento de uma regulamentação adequada são processos longos e

demorados, que podem levar anos até serem implementados e, portanto, é válido que os debates em torno desse assunto se iniciem desde já.

No Brasil, o potencial brasileiro de aproveitamento solar, a necessidade da diversificação da matriz elétrica, que é formada basicamente por usinas hidrelétricas, o desenvolvimento tecnológico que causaram a queda de preço dos sistemas fotovoltaicos, e a criação de políticas de incentivo pelo governo para utilização de fontes de energia renováveis, foram os principais motivos para geração de energia fotovoltaica começar a ganhar espaço no mercado brasileiro. Segundo dados atualizados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade instalada de geração fotovoltaica no Brasil é cerca de 2,3 GW. Espera-se para que para 2026, esse valor atinja a casa dos 7 GW, de acordo expectativas do Plano Decenal de Energia Elétrica - PDE 2026.

Esses valores ainda são baixos se comparados a mercados consolidados no mundo todo. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a líder mundial em potência fotovoltaica instalada acumulada é a China, com 176,1 GW, seguidos por Estados Unidos e Japão. Como abordado no Capítulo 2, apesar de seu crescente mercado fotovoltaico ainda não possuem normativas fortes para o gerenciamento desses resíduos. Por sua vez, a Alemanha, que segue em quarto lugar no ranking mundial, com 45,5 GW, desde de 2015 já possui regulamentada a gestão de resíduos fotovoltaicos. Isso mostra que a reciclagem destes resíduos é uma opção que não se baseia apenas nos volumes dos resíduos, mas também na preocupação ambiental do governo de cada país.

A Alemanha juntamente com outros países da União Europeia, servem de exemplo para demais governos desenvolverem suas políticas de gestão. Como abordado anteriormente, nesses países adota-se a responsabilidade estendida do produtor como um método de gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos. Para XU *et al.* (2018), a responsabilidade dos produtores através do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos pode ser uma abordagem eficiente para o gerenciamento sustentável de materiais. Isso permite que os fabricantes se deparem com a necessidade de desenvolver um design mais ecológico de painéis, buscando reduzir a quantidade de materiais para fabricação, desenvolver tecnologias com materiais não tóxicos e modelos que facilitem os processos de reciclagem, reduzindo os impactos ambientais. Além disso, incentiva a reutilização de materiais reciclados na produção

de novos painéis, garantindo a mesma qualidade do produto e diminuindo a extração de novos recursos da natureza.

No caso do Brasil, as empresas ligadas ao ciclo produtivo de módulos fotovoltaicos são apenas aquelas relacionadas a extração de matérias-primas, produção de silício metalúrgico e montagem dos painéis, não havendo fabricantes em escala competitiva (MIRANDA *et al.*, 2019). Isso dificulta tomar como base a maioria das normativas internacionais para um possível desenvolvimento de políticas de gerenciamento no Brasil. Esse fator também atrapalha a implantação do método de gestão mais preferido dos 3Rs, pois não se pode trabalhar no quesito da redução, por não se possuir fabricantes no país, porém as técnicas de reutilização e reciclagem ainda podem ser abordadas.

O Brasil pode enfrentar dificuldades para a criação de políticas para o gerenciamento do resíduo fotovoltaico, pois essa tecnologia ainda é bastante nova no país e seu total de capacidade instalada pode ainda não atrair vantagens econômicas para implantação da reciclagem. Porém, as discussões em torno do assunto já devem ser iniciadas, pois o crescimento desse setor é evidente e as consequências ambientais dos resíduos fotovoltaicos apontadas nesse estudo podem atingir o país nas décadas futuras. Com isso, algumas sugestões para políticas de gerenciamento futuras dos resíduos de painéis fotovoltaicos já podem ser levantadas.

Como abordado, o Brasil não pode trabalhar diretamente com o gerenciamento a partir do método da redução, pois não existem fabricantes no país. Porém, é possível abordar a criação de regras que incentivem a importação de módulos de fabricantes que garantem possuir um comprometimento ambiental no desenvolvimento e fabricação de seus módulos, como é o caso, por exemplo, da *First Solar* e da *SolarWorld AG*. Como diversos países já buscam a responsabilidade estendida do produtor, cada vez mais indústrias possuirão esses requisitos. XU *et al.* (2018), sugere que o governo deve tomar medidas para obrigar as empresas fabricantes de equipamentos solares a divulgar informações ambientais sobre seus produtos.

Com essas informações é necessário então trabalhar o desenvolvimento de uma consciência social dos impactos que painéis fotovoltaicos descartados incorretamente podem causar ao meio ambiente e a sociedade como um todo, desmistificando o conceito de energia fotovoltaica verde. Para tal, o governo pode

fazer uso da divulgação de dados e informações a partir da mídia, saindo do meio científico para atingir a população como um todo.

A partir disso, algumas sugestões de Tasnia *et al.* (2018) podem ser implementadas no cenário brasileiro, como a criação de vários centros de coleta de painéis fotovoltaicos em todo o país. Inicialmente, sugere-se a implantação desses centros nos estados onde os painéis fotovoltaicos apresentam maior potência instalada, para depois se expandirem gradativamente por todo país. O transporte dos módulos descartados até os centros de coleta pode ser de responsabilidade do consumidor, mas para isso é preciso ter já consolidado a consciência ambiental entre a população. Outra forma de realizar a coleta e transporte dos resíduos aos centros é a partir do aproveitamento da rede logística já estabelecida da montadoras, importadoras, distribuidoras e vendedores de painéis fotovoltaicos.

Nestes centros de coleta, se sugere estabelecer o segundo método de gestão 3R, a reutilização. Os módulos coletados passam por uma triagem, avaliando a possibilidade e a viabilidade da realização de reparos. No caso de recuperação do módulo, estes podem ser revendidos com menor valor para a reutilização. Isso estabeleceria um mercado de painéis secundário e com custo reduzido, que abririam possibilidade para consumo e utilização desta tecnologia de geração de energia elétrica por cidadãos de baixa renda.

Os painéis que não recuperados na etapa anterior, passam então por um processamento físico de moagem inicial, de modo a facilitar o transporte para centros licenciados pelo governo para a reciclagem dos painéis. Como sugestão, as primeiras plantas devem focar em módulos c-Si, pois são os dominantes no mercado, e os volumes de seus resíduos tendem a ser mais expressivo, e a partir disso investir nas demais tecnologias. Após a reciclagem, os materiais recuperados poderiam ser revendidos a indústrias, onde seriam reutilizados para a produção de novos produtos.

Tasnia *et al.* (2018) sugere também que o governo deve estabelecer que todas as empresas do setor solar existentes no mercado compartilhem o custo incorrido pelos centros de coleta e pelas plantas de reciclagem, de acordo com sua participação de mercado. Os montantes obtidos com a revenda dos materiais reciclados, e também da revenda dos painéis recuperados para reutilização, podem ser utilizados para abater as despesas de coleta e reciclagem dos módulos. Isso reduziria os custos cobrados às empresas envolvidas no setor fotovoltaico.

É evidente que essas despesas seriam repassadas ao consumidor final. Desta forma, a escolha de qual método de reciclagem utilizado nas plantas deve ser um processo muito cuidadoso. Uma análise financeira aprofundada seria necessária para avaliar quais métodos são os economicamente mais viáveis. Um estudo das tendências de crescimento dos fluxos dos resíduos fotovoltaicos também precisaria ser realizado para avaliar qual o momento mais propício financeiramente para o início da aplicação das políticas de gerenciamento no país. Procurando com isso, evitar que o custo repassado aos consumidores seja muito elevado, o que acarretaria na queda do consumo desta forma de geração de energia elétrica.

O apoio financeiro do governo é fundamental enquanto os volumes ainda não são grandes o suficiente. Porém com os futuros avanços tecnológicos do setor, os custos dos módulos e dos processos de reciclagem tendem a reduzir. Além disso, com as previsões do crescimento do volume dos resíduos fotovoltaicos, ao longo dos anos, os processos de reciclagem teriam uma lucratividade, como abordado anteriormente. Por consequência, os processos seriam capazes de se manter por conta própria, sem apoio financeiro do governo e ou de demais partes envolvidas, criando empregos e atraindo investidores.

Desta forma, apresenta-se um resumo das etapas sugeridas para implantação de um sistema para gerenciamento de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil:

- Importação de módulos de fabricantes com comprometimento ambiental;
- Consciência social dos impactos de painéis fotovoltaicos descartados;
- Criação de centros de coleta em todo o país;
- Rede de logística para transporte aos centros de coleta;
- Reutilização;
- Primeiras plantas focadas em módulos c-Si;
- Materiais reciclados destinados a revenda e reutilização;
- Despesas dos processos compartilhadas entre as empresas do ramo;
- Montantes obtidos com a venda usados para abater despesas;
- Realização de estudos para avaliar o método de reciclagem mais viável;

- Análise do fluxo de resíduos;
- Criação de regulamentação adequada;
- Fiscalização, penalidades e multas pelo descarte inadequado.

Seguindo esses procedimentos, a logística reversa, instituída no Brasil pela Lei nº 12.305/2010, para o gerenciamento de REEE, seria estabelecida, atendendo os resíduos dos painéis fotovoltaicos em fim de vida útil. Porém, sem uma regulamentação adequada que fortaleça a fiscalização, o estabelecimento de penalidades e multas pelo descarte inadequado dos resíduos de painéis, e o aumento do custo de disposição em aterro para o descarte dos materiais tóxicos dos módulos, o gerenciamento tenderá a ser deficiente e não será adotado de forma efetiva.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou uma análise, a partir de uma revisão sistemática da literatura, dos impactos ambientais causados pelos resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil, caracterizando as existentes políticas de gerenciamento e os métodos de reciclagem praticados atualmente no mundo.

Os impactos ambientais, associados aos resíduos dos painéis fotovoltaicos em fim de vida, são marcados principalmente pelos materiais tóxicos utilizados para a fabricação do módulo, sendo eles o cádmio e o chumbo. Seus efeitos são nocivos ao meio ambiente e aos seres humanos, quando descartados de forma inadequada. Além disso, o simples descarte dos painéis em aterros sanitários causa o desperdício de matérias-primas e materiais preciosos, como a prata, que tendem a ser tornar escassos no futuro.

A reciclagem por sua vez ainda não é aplicada amplamente em escala comercial. Apenas alguns métodos são atualmente utilizados em plantas de reciclagem e ainda enfrentam dificuldades devido ao custo de aplicação, aos impactos ambientais que os próprios métodos podem acarretar ao meio ambiente e por não atingirem a recuperação total dos materiais. Entretanto, indústrias e pesquisadores tem desenvolvido inúmeras técnicas reciclagem e recuperação de painéis solares, que se encontram, em sua maioria ainda em fase laboratorial.

Apesar da reciclagem dos resíduos fotovoltaicos trazer benefícios ambientais frente ao descarte em aterro sanitário, esse setor enfrenta dificuldades. Isso é causado pelos baixos volumes atuais dos resíduos e pela existência de diversas topologias de módulos, o que dificulta o desenvolvimento de um método de reciclagem ideal que possa atender a demanda de reciclagem de todos os modelos.

Tendo isso em vista, e considerando que os volumes desses resíduos comecem a se tornar expressivos nas próximas décadas, alguns países já iniciaram o desenvolvimento e implantação de políticas que normatizam a obrigatoriedade do gerenciamento e recuperação dos painéis em fim de vida útil. Dentre as políticas internacionais, a mais evidente é a responsabilidade estendida do produtor, onde os fabricantes dos painéis tornam-se responsáveis por todo o ciclo de vida dos módulos, desde a fabricação, coleta e reciclagem dos produtos.

A crescente utilização da tecnologia também é uma realidade no Brasil. Por possuir um mercado fotovoltaico ainda relativamente jovem, a implantação de um sistema de gerenciamento adequado, meios de coleta e a construção de locais especializados de reciclagem, será um longo e difícil desafio para a sociedade brasileira. Pois, ao contrário dos demais países que possuem mercados fortes e políticas já estabelecidas, o Brasil não possui fábricas de painéis solares, não podendo simplesmente adotar a responsabilidade exclusiva do produtor.

Com isso, a criação de políticas fortes que estabeleçam a logística reversa, a aplicação de multas para descarte inadequado, o estabelecimento de uma fiscalização reforçada e a elevação do custo para descarte em aterros sanitários, são essenciais para permitir um gerenciamento adequado dos resíduos de fotovoltaicos em fim de vida, no Brasil. Além desses fatores, também é evidente a necessidade da conscientização e envolvimento de todas as partes interessadas no setor fotovoltaico, desde montadoras, importadoras, governo até o consumidor final, para se obter o sucesso do gerenciamento desses resíduos.

O crescente volume de resíduos de painéis fotovoltaicos apresenta oportunidades únicas para criar valor, negócios locais e empregos e, portanto, novos meios econômicos. Além disso, quando se alcançar estruturas organizadas e funcionais de coleta e reciclagem, os benefícios ambientais serão vantajosos para toda a sociedade, aliviando a contaminação do ambiente, o desperdício de matérias primas, o esgotamento de recursos, além de reduzir as emissões de carbono e o consumo de energia necessários para a fabricação de novos módulos.

Desta forma, a opção de reciclar ou não, painéis fotovoltaicos, é baseada em diversas variáveis, incluindo políticas voltadas para painéis em fim de vida útil, questões econômicas, recuperação de materiais e elementos raros, e ainda preocupações com o meio ambiente e com a saúde dos seres humanos. Com isso, é possível propor pesquisas futuras relacionadas a esses tópicos para se alcançar um maior aprofundamento em torno do tema:

- Realizar uma investigação da rentabilidade financeira de vários métodos emergentes de reciclagem de resíduos fotovoltaicos, de modo a verificar as opções mais vantajosas;
- Avaliar as vantagens e desvantagens dos novos métodos de reciclagem patenteados para verificar qual obtém melhores desempenhos;

- Promover um estudo dos futuros fluxos de resíduos no país e avaliar quando a reciclagem seria economicamente viável.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: Setembro de 2019.

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Infográfico ABSOLAR**. Disponível em <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: Setembro de 2019.

BANG, Y.-Y; HONG, N.-J; SUNG LEE, D; LIM, S.-R. Comparative assessment of solar photovoltaic panels based on metal-derived hazardous waste, resource depletion, and toxicity potentials. **International Journal of Green Energy**, v. 15, n. 10, p. 550–557, 2018.

BOGACKA, M.; PIKOŃ, K.; LANDRAT, M. Environmental impact of PV cell waste scenario. **Waste Management**, v. 70, p. 198–203, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: MME/EPE, 2017. Disponível em <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: Setembro de 2019.

CORDEIRO, Alexander Magno; DE OLIVEIRA, Glória Maria; RENTERÍA, Juan Miguel; GUIMARÃES, Carlos Alberto. Revisão sistemática: Uma revisão narrativa. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**, v. 34, n. 6, p. 428–431, 2007.

CYRS, William D; AVENS, Heather J; CAPSHAW, Zachary A; KINGSBURY, Robert A; SAHMEL, Jennifer; TVERMOES, Brooke E.. Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin film photovoltaic (PV) panels. **Energy Policy**, v. 68, n. May, p. 524–533, 2014.

GARCEZ, Catherine Aliana Gucciardi. What do we know about the study of distributed generation policies and regulations in the Americas? A systematic review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. December 2016, p. 1404–1416, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Editora Atlas. v. 4, 2002.

HERNANDEZ, R. R.; EASTER, S. B.; MURPHY-MARISCAL, M. L.; MAESTRE, F. T.; TAVASSOLI, M.; ALLEN, E. B.; BARROWS, C. W.; BELNAP, J.; OCHOA-HUESO, R.; RAVI, S.; ALLEN, M. F. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 766–779, 2014.

IRENA; IEA-PVPS. **End-of life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Alemanha, 2016. Disponível em: <
https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>.

LEITE FILHO, Geraldo Alemandro. Padrões de produtividade de autores em periódicos e congressos na área de contabilidade no Brasil: um estudo bibliométrico. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 12, n. 2, p. 533–554, 2008.

LUNARDI, Marina Monteiro; ALVAREZ-GAITAN, Juan Pablo; BILBAO, José I.; CORKISH, Richard. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. **Solar Panels and Photovoltaic Materials**, 2018.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Photovoltaic solar energy: A briefly review. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MAHMOUDI, Sajjad; HUDA, Nazmul; ALAVI, Zahraossadat; ISLAM, Md Tasbirul; BEHNIA, Masud. End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. March, p. 1–16, 2019.

MALANDRINO, Ornella; SICA, Daniela; TESTA, Mario; SUPINO, Stefania. Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy. **Sustainability**, v. 9, n. 4, 2017.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; KHALIFAH, Zainab; ZAKUAN, Norhayati; JUSOH, Ahmad; NOR, Khalil Md; KHOSHNOUDI, Masoumeh. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. December 2016, p. 216–256, 2017.

MCDONALD, N. C.; PEARCE, J. M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 7041–7047, 2010.

MIRANDA, Rosana T.; LEANDRO, Francielle da S.; SILVA, Tatiane C. Gestão do Fim de Vida de Módulos Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 364–383, 2019.

NAKAGAWA, Elisa Yumi; SCANNAVINO, Katia Romero Felizardo; FABBRI, Sandra Camargo Pinto Ferraz; FERRARI, Fabiano Cutigi. Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: Teoria e Prática. **Elsevier Brasil**, 2017.

OECD. **Sustainable Manufacturing and Eco-Innovation**, DSTI/IND(2008)16/REV1. p. 1–33, 2008.

PADOAN, F. C. S. M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. **Solar Energy**, p. 746–761, 2019.

SALIM, Hengky K; STEWART, Rodney A; SAHIN, Oz; DUDLEY, Michael. Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 537–554, 2019.

SICA, Daniela; MALANDRINO, Ornella; SUPINO, Stefania; TESTA, Mario; LUCCHETTI, Maria Claudia. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3, p. 2934–2945, 2018.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. UFSC. v. 4, 2005.

SOARES, Patrícia Bourguignon; CARNEIRO, Teresa Cristina Janes; CALMON, João Luiz; CASTRO, Luiz Otávio da Cruz de Oliveira. **Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science** - Bibliometric analysis of the Brazilian scientific production on Building and Construction Technologies in the Web of Ambiente Construído, v. 16, n. 1, p. 175–185, 2016.

TAO, Jing; YU, Suiran. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 141, p. 108–124, 2015.

TASNIA, Kimia; BEGUM, Shanaj; TASNIM, Zarin; KHAN, Md. Ziaur Rahman. **End-of-Life Management of Photovoltaic Modules in Bangladesh**. 2018 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). Anais 345 E 47TH ST, Nova York, NY 10017 EUA: IEEE, 2018.

TIMILSINA, Govinda R.; KURDGELASHVILI, Lado; NARBEL, Patrick A. Solar energy: Markets, economics and policies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 449–465, 2012.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, v. 75, p. 450–458, 2018.

ANEXOS

ANEXO A - DETALHES DE PATENTES RECENTES DOS MÉTODOS DE
RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM FIM DE
VIDA

Tabela 9 - Detalhes de patentes recentes dos métodos de recuperação e reciclagem das células fotovoltaicas em fim de vida.

ID	TÍTULO	PAINEL	LOCAL*	ANO
CN107285387A	<i>Production method of material used for extracting tellurium from photovoltaic wastes and application of the material</i>	<i>Thin film</i>	CN	2017
CN106277513A	<i>Method and system for treating high-ammonia nitrogen photovoltaic wastewater containing cadmium and thiourea</i>	-	CN	2017
CN104112850B	<i>A method for preparing a lithium-ion battery and application of the negative electrode material based on silicon photovoltaic industry waste</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2017
CN107266031A	<i>The method of using crystalline silicon cutting waste mortar producing sintered brick, block or ceramic article</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2017
CN105481626B	<i>A method of cutting waste as a polycrystalline silicon photovoltaic direct conversion of methane anaerobically catalyst ethylene, aromatics and hydrogen</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2017
CN106654220A	<i>Preparation method of high-capacity carbon-silicon composite negative material</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2017
WO2017100443A1	<i>Recovery of valuable or toxic metals from silicon solar cells</i>	<i>S-Ci</i>	US, WO	2017
EP3178576A1	<i>Method for recycling the silver contained in a photovoltaic cell</i>	<i>S-Ci</i>	EP, FR	2017
JP6133475B1	<i>Frame separation apparatus of the solar panels</i>	<i>S-Ci</i>	JP, WO	2017
CN106987717A	<i>Recovery method of copper indium gallium diselenide material</i>	<i>Thin film</i>	EP, KR, CN, CA, WO	2017
WO2017124891A1	<i>Method for recycling copper indium gallium selenium materials</i>	<i>Thin film</i>	EP, KR, CN, CA, WO	2017
CN205702871U	<i>Old and useless photovoltaic module annular insertion groove</i>	-	CN	2016
EP2961855A2	<i>Hydrometallurgical process for recovery of metals and/or semimetals from waste materials containing compound semiconductor materials and/or back contact materials and/or transparent electrically conducting oxides (tcos)</i>	<i>S-Ci e Thin film</i>	US, EP, JP, KR, DE, WO	2016

CN104032136B	<i>A method for recovering copper indium gallium selenium from the waste</i>	<i>Thin film</i>	CN	2016
CN104609596B	<i>An acid cleaning process wastewater reuse PV</i>		CN	2016
CN105336922A	<i>Preparation method and application for lithium-ion battery negative electrode material based on photovoltaic silicon waste material</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
CN104150911B	<i>A microwave assisted synthesis of nano-temperature fast silicon nitride-silicon carbide composite powders Method</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
EP2556893A3	<i>Method and assembly for the recovery of metals from composite materials, in particular from silicon solar modules, thin film solar modules, LCD displays or the like</i>	<i>S-Ci</i>	EP, DE, ES	2016
CN105355709B	<i>Glass separation method of a crystalline silicon solar cell module</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
CN105895731B	<i>A method for recovering a flexible solar module</i>	<i>Thin film</i>	CN	2016
CN105618461A	<i>Method for recycling crystalline silicon solar cell module</i>	<i>S-Ci</i>	CN, WO	2016
CN106206848A	<i>Novel recovery method for failure photovoltaic module</i>	<i>Thin film</i>	CN	2016
WO2016110825A1	<i>Method and apparatus for the disposal of photovoltaic panels</i>	<i>S-Ci</i>	EP, WO	2016
CN105436191A	<i>Recovery method of high-purity silicon in waste solar cells</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
CN105618461A	<i>Method for recycling crystalline silicon solar cell module</i>	<i>S-Ci</i>	EP, WO	2016
CN105355541A	<i>Solar cell recycling method</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
CN105347379A	<i>Method for recycling aluminium and silver from waste crystalline silicon solar cell</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2016
CN105355541A	<i>Solar cell recycling method</i>		CN	2016
EP2998038A1	<i>Method and apparatus for detaching glass from a mono- or polycrystalline silicon-based photovoltaic panel</i>	<i>S-Ci</i>	EP	2016
CN105312303A	<i>No-damage recycling method for photovoltaic module</i>		CN	2016
JP2015508375A	<i>Recycling of copper indium gallium diselenide</i>	<i>Thin film</i>	US, EP, JP, WO	2016
CN204417248U	<i>Photovoltaic acid cleaning wastewater recycling device</i>	-	CN	2015
EP2858125A1	<i>Method for disassembling the photovoltaic module</i>		US, EP, JP	2015
CN104017995A	<i>Method for recycling copper, indium, gallium and selenium from indium gallium selenium wastes containing copper</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
CN104018186A	<i>Method for recovering copper, indium, gallium and selenium</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
CN203999753U	<i>Recovery devise of noble metal indium in lab</i>	-	CN	2014
WO2014141311A1	<i>Thermo-mechanical controlled cryogenic delamination process for the full recovery of rigid mono-, polycrystalline or amorphous materials coated with plastic materials</i>	<i>S-Ci</i>	EP, CN, ES, WO	2014

CN103866129A	<i>Recycling method of CdTe solar cell module</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
CN103978021B	<i>One waste crystalline silicon solar panel dismantling recycles processing method</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2014
CN103978010B	<i>A silicon solar cell module EVA crystal heat treatment method of waste</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2014
ES2637696T3	<i>Removal system for photovoltaic original panel that allows the recovery of materials</i>	<i>S-Ci</i>	US, EP, ES, WO	2014
CN103920698B	<i>Crystalline silicon solar cells one waste sheet classification method of recovering resources</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2014
CN103920698A	<i>Method for recycling resources in waste crystal solar silicon cell piece in classified mode</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2014
CN104201248A	<i>Recovery method of thin film solar cells</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
WO2014184816A1	<i>Process for treating spent photovoltaic panels</i>	<i>Thin film</i>	EP, ES, WO,	2014
CN103866129B	<i>A method of recovering CdTe solar cell module</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
CN104201248B	<i>A thin film solar cell recovery</i>	<i>Thin film</i>	CN	2014
JP5938309B2	<i>Recycling method of a solar cell panel</i>	<i>Thin film</i>	JP	2014
JP2014108375A	<i>Method of recovering constituent material of solar cell element</i>	<i>S-Ci</i>	JP	2014
US9276157B2	<i>Methods of treating a semiconductor layer</i>	<i>Thin film</i>	US, KR, CN, DE, WO	2014
KR20130060708A	<i>Recycling method of photovoltaic waste facility</i>	<i>S-Ci</i>	KR	2013
CN103184338A	<i>Recovery method of copper indium gallium selenide thin film solar panel</i>	<i>Thin film</i>	CN	2013
CN203222529U	<i>Photovoltaic wastewater treatment system</i>		CN	2013
CN102851506A	<i>Method for extracting and recovering silver from waste solar cell</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2013
CN103199147B	<i>Recycle processing method telluride thin film solar cell Cd</i>	<i>Thin film</i>	CN	2013
CN102408114A	<i>Method for producing trichlorosilane by utilizing photovoltaic crystalline silicon processing waste mortar</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2012
CN102557291A	<i>Zero-emission process for photovoltaic wastewater</i>	-	CN	2012
CN102001766B	<i>Defluorinating method of photovoltaic wastewater</i>	-	CN	2012
CN102416401B	<i>Process and equipment for recovering photovoltaic component through thermal high-speed centrifugal decomposition</i>	-	CN	2012
CN102544239B	<i>Method and device for decomposing and recycling photovoltaic component</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2012
US8821711B2	<i>Process to recycle end of life CdTe modules and manufacturing scrap</i>	<i>Thin film</i>	US	2012
WO2011137268A1	<i>Method for recovering tellurium from module comprising cadmium telluride</i>	<i>Thin film</i>	CN, WO	2011
CN202072558U	<i>Photovoltaic wastewater zero discharge system</i>	-	CN	2011
CN102151669B	<i>Processing method of coating film crushed materials of solar silicon cell</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2011

CN102234811B	<i>Method for recovering tellurium from cadmium telluride-contained assembly</i>	<i>Thin film</i>	CN, WO	2011
DE102010061230A1	<i>System and method for the recovery of cadmium telluride (CdTe) of system components in the manufacture of photovoltaic (PV) modules are used</i>	<i>Thin film</i>	US, CN, DE,	2011
US20100189612A1	<i>System and method for separating tellurium from cadmium waste</i>	<i>Thin film</i>	US, EP, WO	2010
DE102008058530B4	<i>Technical process for the recycling of thin film solar modules</i>	<i>Thin film</i>	DE	2010
CN101719529B	<i>Method for recovering crystalline silicon cell plate in double-glass solar cell assembly with PVB interbed</i>	<i>S-Ci</i>	CN	2010
DE102008058530B4	<i>Technical process for the recycling of thin film solar modules</i>	<i>Thin film</i>	DE	2010
WO2008102457A1	<i>Method of recovering constituent member of cis type thin film solar cell module</i>	<i>Thin film</i>	WO	2008
US7731920B2	<i>System and method for separating tellurium from cadmium waste</i>	<i>Thin film</i>	US, EP, WO	2006
EP1187224B1	<i>Recycling method for CdTe/CdS thin film solar cell modules</i>	<i>Thin film</i>	US, EP, JP, DE	2002
US5897685A	<i>Recycling of CdTe photovoltaic waste</i>	<i>Thin film</i>	US	1999
US5779877A	<i>Recycling of CIS photovoltaic waste</i>	<i>Thin film</i>	US	1998

LOCAL:

EP *European Patent Office* (Instituto Europeu de Patentes)

US *United States Patent* (Patente dos Estados Unidos)

JP *Japanese Patent Office* (Instituto Japonês de Patentes)

DE *German Patent Office* (Instituto Alemão de Patentes)

WO WPO- PCT: *World Intellectual Property Organization - WPO* (Organização Mundial da Propriedade Intelectual), *The Patent Cooperation - PCT* (Cooperação em matéria de patentes)

CN *Chinese Patent Office* (Instituto Chinês de Patentes)

KR *Korean Intellectual Property Office* (Escritório Coreano de Propriedade Intelectual)

ES *Spanish Patent Office* (Instituto Espanhol de Patentes)

FR *French Patent Office* (Instituto Francês de Patentes)

Fonte: Adaptado de Mahmoudi *et al.* (2019)