



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ELAÍNE VIEIRA DE OLIVEIRA

PROCESSOS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
DE PRIMEIRA GERAÇÃO

FORTALEZA

2021

ELAÍNE VIEIRA DE OLIVEIRA

**PROCESSOS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
DE PRIMEIRA GERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Fabíola Leite Almeida.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O46p Oliveira, Elaine Vieira de.
Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração / Elaine Vieira de Oliveira. – 2021.
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

1. Módulos fotovoltaicos. 2. Reciclagem. 3. Ciclo de vida . 4. Logística reversa. I. Título.

CDD 621.042

ELAÍNE VIEIRA DE OLIVEIRA

**PROCESSOS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
DE PRIMEIRA GERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Fabíola Leite Almeida.

Aprovada em 09 / 09 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Maria Aleksandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Resumo

O aumento de instalações fotovoltaicas na última década resultou no aumento do nível de resíduos fotovoltaicos levando a uma crescente preocupação. Estudos revelam que em 2050 haverá entre 60 e 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos em circulação, logo, se faz necessária uma avaliação crítica sobre os possíveis desafios, oportunidades e modelos que possam vir a se tornar argumentos para uma análise crítica da reciclagem. A adoção dos princípios da economia circular ajuda a compensar os fatores ambientais, como as emissões associadas aos estágios de fabricação e aumentar as taxas de reciclagem e recuperação. Os módulos de silício cristalino (c-Si) tiveram uma participação de mercado de 80–90% nos últimos 40 anos e constituirão a maior parte do fluxo de resíduos fotovoltaicos projetados. A presente análise contribuirá para a compreensão dos processos de fabricação do módulo a base de c-Si e para a melhor abordagem do desafio de reciclar esse vasto e inevitável fluxo de resíduos. Os processos de reciclagem oferecem o melhor potencial para a recuperação ideal do material e energia encontrados nos módulos de primeira geração promovendo uma economia verdadeiramente circular dentro da indústria fotovoltaica bem estabelecida. Este trabalho trata de métodos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração e avalia a contribuição de tais processos para o meio ambiente, bem como para a redução da extração da matéria-prima, através da avaliação do ciclo de vida, sendo esta a metodologia mais usada acadêmica e industrialmente na determinação dos impactos ambientais causados pelos produtos ou serviços avaliados, incluindo módulos fotovoltaicos. Em virtude do tema supracitado, várias técnicas de reciclagem podem ser aplicadas, para o cenário brasileiro destacam-se dois métodos: o primeiro utiliza o processo de pirólise para a separação inicial dos componentes seguido por processos químicos para separação do material semicondutor; no segundo método é utilizada a trituração dos componentes dos módulos, e a separação do material semicondutor é realizada através de processos mecânicos, onde é possível obter uma recuperação superior a 85% dos seus principais componentes. Logo, se faz necessária a adequação política acerca dos métodos de reciclagem desses materiais, principalmente através da logística reversa, designando os responsáveis legais por tais processos bem como incentivando-os.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos, reciclagem, ciclo de vida, logística reversa.

Abstract

The increase in photovoltaic installations over the last decade has resulted in the increase in the level of photovoltaic waste leading to growing concern. Studies show that by 2050 there will be between 60 and 78 million tons of photovoltaic waste in circulation, therefore, a critical assessment of the possible challenges, opportunities and models that may become arguments for a critical analysis of recycling is necessary. Adopting circular economy principles helps offset environmental factors such as emissions associated with manufacturing stages and increase recycling and recovery rates. Crystalline silicon (c-Si) modules have had an 80–90% market share over the past 40 years and will make up the majority of the projected photovoltaic waste stream. This analysis will contribute to an understanding of the manufacturing processes of the c-Si-based module and to a better approach to the challenge of recycling this vast and inevitable waste stream. Recycling processes offer the best potential for optimal recovery of material and energy found in first generation modules promoting a truly circular economy within the well-established photovoltaic industry. This work deals with methods of recycling first-generation photovoltaic modules and evaluates the contribution of such processes to the environment, as well as to the reduction of raw material extraction, through life cycle assessment, which is the most important methodology. used academically and industrially in determining the environmental impacts caused by the products or services evaluated, including photovoltaic modules. Due to the aforementioned theme, several recycling techniques can be applied, for the Brazilian scenario two methods stand out: the first uses the pyrolysis process for the initial separation of components followed by chemical processes for the separation of the semiconductor material; in the second method, the crushing of the components of the modules is used, and the separation of the semiconductor material is carried out through mechanical processes, where it is possible to obtain a recovery of more than 85% of its main components. Therefore, it is necessary the political adequacy about the recycling methods of these materials, mainly through reverse logistics, designating those responsible for such processes as well as encouraging them.

Keywords: Photovoltaic modules, recycling, life cycle, reverse logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B), e um conjunto de módulos fotovoltaicos (C).....	16
Figura 2 - Células fotovoltaicas de primeira geração.....	17
Figura 3 - Fluxograma do processamento da sílica para os módulos fotovoltaicos de primeira geração.....	18
Figura 4 - Representação de um módulo de segunda geração.	19
Figura 5 - Módulos fotovoltaicos de terceira geração e suas divisões.	20
Figura 6 – Fabricação de painéis FV em 2020.....	20
Figura 7 - Gráfico da projeção da distribuição de materiais no resíduo eletrônico, por tipo de tecnologia dos módulos fotovoltaicos, em milhões de toneladas.	21
Figura 8 - Estrutura dos materiais usados na fabricação de um módulo fotovoltaico.....	22
Figura 9 –Aplicações da prata.....	25
Figura 10 – Média das reservas mundiais de prata em 10 ³ ton.....	26
Figura 11 – Média da produção mundial da prata em 10 ³ ton.....	27
Figura 12 - Destino dos resíduos sólidos no Brasil.....	33
Figura 13 - Distribuição média dos diferentes tipos de materiais presentes nos REEE.....	34
Figura 14 - Principais etapas do ciclo de vida de um produto.....	39
Figura 15 - Fases do Ciclo de Vida.....	41
Figura 16 - Quatro principais formas de definir a fronteira de um sistema.....	42
Figura 17 - Esquema geral do caminho percorrido por uma emissão até o impacto.....	43
Figura 18 - Ciclo de Vida de um Sistema Fotovoltaico.....	45
Figura 19 – Estágio do Ciclo de Vida do sistema fotovoltaico.....	47
Figura 20 – Fluxo da gestão do fim de vida.....	51
Figura 21 – Etapas de reciclagem dos componentes dos módulos FV.....	55
Figura 22 – Métodos 1 e 2 da reciclagem de módulos fotovoltaicos.....	56
Figura 23 – Fluxograma de processos típicos para reciclagem de REEE.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição relativa de um módulo fotovoltaico de c-Si.....	21
Tabela 2 - Composição dos módulos fotovoltaicos de primeira e segunda geração.....	24
Tabela 3 - Metais raros encontrados nos módulos fotovoltaicos e os fatores que contribuem para a valorização econômica desses metais nos módulos fotovoltaicos.....	24
Tabela 4 - Classificação do minério de prata segundo sua concentração.....	26
Tabela 5 – Resumo dos recicladores que participaram do estudo.....	28
Tabela 6 - Emissões durante a produção de módulos fotovoltaicos de silício policristalino....	31
Tabela 7 - Elementos metálicos e semimetálicos que podem ser recuperados de módulos fotovoltaicos.....	37
Tabela 8 – Tecnologias de reciclagem para módulos c-Si encontradas na literatura.....	54
Tabela 9 – Destino dos componentes.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	Poliamida/PET/Poliamida
a-Si	Silício amorfo
CdTe	Telureto de cádmio
CETEA	Centro de Tecnologia de Embalagem
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CPV	Concentrador fotovoltaico
c-Si	Silício cristalino
CZ	Cristalização Czochralski
DSSC	Dry-sensitised solar cell
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
eV	Elétrons-volt
EVA	Ethylene Vinyl Acetat
Fe	Ferro
FRELP	Full Recovery End-of-Life Photovoltaic
FV	Fotovoltaico
GaAs	Arseneto de gálio
GANAP	Grupo de Apoio à Normalização
GP2	Grupo de Prevenção da Poluição
g/t	Gramas por tonelada
GW	Gigawatt
ICV	Inventário do ciclo de vida
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITAL	Instituto de Tecnologia de Alimentos
m-Si	Silício monocristalino
mg-Si	Silício metalúrgico

mg/L	Miligramas por litro
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
p-Si	Silício policristalino
Pb	Chumbo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PV CYCLE	Photovoltaic Cycle
PV MOREDE	Photovoltaic Mobile Recycling Device
REEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
Si	Silício
ton/h	Toneladas por hora
TPA	Tedlar/PET/Poliamida
TPT	Tedlar/PET/Tedlar
UV	Ultravioleta
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivo geral.....	14
1.3	Objetivos específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Módulos Fotovoltaicos.....	15
2.1.1	Composição dos módulos de silício cristalino.....	21
2.2	Panorama mundial.....	27
2.3	Panorama brasileiro.....	29
2.4	Impactos.....	30
2.5	Reciclagem.....	32
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	Avaliação do ciclo de vida.....	38
3.2	Estrutura da avaliação do ciclo de vida.....	40
3.3	Avaliação do ciclo de vida no Brasil.....	44
3.4	Ciclo de vida de sistema fotovoltaico de primeira geração.....	45
3.5	Fim de vida útil dos módulos fotovoltaicos.....	50
4	PROPOSTAS E DISCUSSÃO.....	53
4.1	Tecnologias de reciclagem para sistemas fotovoltaicos.....	53
4.2	Gestão do fim da vida útil dos módulos FV no mundo.....	61
4.3	Propostas para implantação da reciclagem de sistemas fotovoltaicos no Brasil.....	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

1 Introdução

A energia solar fotovoltaica é considerada como uma energia limpa, durante sua operação não há emissão de gases poluentes nem de ruídos, por isso ela apresenta um grande potencial de crescimento para o futuro energético e para o desenvolvimento sustentável (SCOLLA, 2020).

Logo, à medida que a capacidade fotovoltaica aumenta, também aumentará o volume de módulos em fim de vida. Estimativas com base em uma suposição de vida de 30 anos com cenários de perda antecipada, encontra-se um cumulativo de módulos fotovoltaicos em fim de vida que pode totalizar 1 milhão de toneladas nos Estados Unidos até 2030 e até 10 milhões em 2050 (WECKEND *et al.*, 2016). Além disso, é preciso considerar fenômenos adversos que podem antecipar o descarte desses equipamentos, como eventos catastróficos, podendo aumentar essas projeções.

A crescente quantidade de módulos fotovoltaicos desativados nos Estados Unidos levou a uma discussão sobre opções e oportunidades de gestão. Opções de gerenciamento para os painéis que chegaram ao final da via útil incluem reutilização, reciclagem e recuperação de recursos. A disposição de módulos fotovoltaicos aumenta a carga sobre a capacidade do aterro sanitário no país, enquanto a reconstrução para reutilização e opções de reciclagem para recuperar materiais valiosos fornecem ao mercado secundário oportunidades e benefícios auxiliares (WECKEND *et al.*, 2016).

Entre os componentes presentes nos módulos fotovoltaicos se encontram polímeros, materiais cerâmicos e metais como a prata e o índio. O descarte incorreto dos módulos fotovoltaicos ao meio ambiente pode causar problemas para os corpos d'água, além de ocasionar a toxidade do meio gerando a morte da fauna e da flora. Além disso, os componentes dos painéis dispõem de um valor econômico agregado, principalmente quando se fala dos metais. Como é de amplo conhecimento o uso de sistemas fotovoltaicos está em crescimento mundial, obrigando os fabricantes a aumentarem sua produção, porém os metais presentes nos módulos não acompanham o crescimento requerido, fator que torna a recuperação desses materiais economicamente viáveis (PRADO, 2018).

A recuperação de recursos do material do módulo fotovoltaico pode reduzir as preocupações ambientais e da cadeia de abastecimento levando a novas e ampliadas oportunidades de mercado, criação de empregos e benefícios econômicos para a indústria solar fotovoltaica. Mas a evidência anedótica sugere que hoje o armazenamento e o descarte desses equipamentos estão ocorrendo e que menos de 10% estão sendo reciclados nos Estados

Unidos (WECKEND *et al.*, 2016). No Brasil, a empresa SunR apresenta um processo de reciclagem de painéis fotovoltaicos com uma eficiência de até 92% (SUNR, 2021).

Alguns módulos fotovoltaicos estão sendo descartados em aterros municipais, enquanto outros estão sendo armazenados até a reciclagem economicamente viável surgir ou outras opções de gerenciamento destes resíduos tornarem-se disponíveis (ABSOLAR, 2020).

À medida que aumenta a consciência das práticas atuais, as partes interessadas da indústria, reguladores e formuladores de políticas estão começando a estudar e identificar barreiras para uma mão de obra de baixo custo de reciclagem de módulo.

Os resíduos fotovoltaicos apresentam certa dificuldade sobre a sua disposição final, devido à variedade de materiais em sua composição. Não existe dados oficiais acerca de uma grande geração de descarte de módulos fotovoltaicos, isso porque sua vida útil dura em média 25 a 30 anos, e ela começou a ser implementada em larga escala há cerca de 35 anos, portanto é de se esperar uma grande quantidade de resíduos FV num futuro próximo. É estimado um descarte de um milhão de toneladas de módulos fotovoltaicos em 2035 (DIAS, 2015).

Os módulos são caracterizados como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), a diretiva que a regula exige que os fabricantes sejam os responsáveis pela gestão dos resíduos gerados pelos seus produtos (SOARES, 2017).

Além do mercado incipiente, outro entrave para as medidas relacionadas ao manuseio correto e o tratamento dos módulos FV após sua vida útil são os estudos mais aprofundados sobre os impactos ambientais gerados pelo descarte incorreto dos resíduos fotovoltaicos. A ausência de uma legislação especificada no assunto também dificulta o desenvolvimento e implantação da reciclagem dos resíduos oriundos dessa tecnologia. A União Europeia foi a primeira a apresentar restrições de descarte e orientações acerca da reciclagem, dessa forma as empresas produtoras que comercializam os módulos implantaram os processos de reciclagem por responsabilidade ambiental, devendo se tornar inspiração no desenvolvimento de uma legislação nacional sobre o descarte dos resíduos FV (PRADO, 2018).

Para determinar os impactos causados pelos módulos FV, é preciso analisá-los durante todos os seus processos desde a extração da matéria-prima da natureza até o fim da sua vida útil, onde os resíduos podem ser reciclados, reutilizados, participar da logística reversa ou serem descartados de forma incorreta, para o presente trabalho utilizou a avaliação de ciclo de vida (ACV), sendo possível determinar todos os impactos ambientais causados pelos painéis fotovoltaicos durante seu ciclo de vida. Tal avaliação é considerada uma das ferramentas principais para definir os impactos ambientais (SCOLLA, 2020).

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode recuperar materiais de alto valor (por exemplo, silício, índio, prata, telúrio e cobre) para uso na fabricação nacional ou para venda no mercado de commodities. Uma recuperação nacional autossuficiente desses recursos pode reduzir a dependência de importações estrangeiras e aliviar as restrições de recursos. Além disso, a recuperação desses materiais também pode reduzir resíduos, os impactos ambientais e a energia total necessária para minerar, transportar e refinar materiais virgens e fabricar novos módulos fotovoltaicos (CURTIS *et al.*, 2021).

Também é possível deduzir que a recuperação de recursos pode levar a novos e expandidos materiais do módulo fotovoltaico. Recicladores terceirizados e empresas de gerenciamento de ciclo de vida podem expandir seus serviços que incluem serviços de manuseio, transporte e reciclagem de módulos fotovoltaicos. Novas empresas podem também surgir para fornecer serviços de desativação e reciclagem. Além disso, a economia de custos, o aumento dos lucros e o aumento da competitividade são motivadores para a reciclagem de painéis FV.

Os fabricantes podem reduzir seus custos reciclando e reutilizando os materiais recuperados dos módulos fotovoltaicos. Fabricantes, proprietários de sistemas, recicladores terceirizados e outros também podem gerar receita por venda de materiais recuperados em mercados de commodities. Além disso, os proprietários do sistema e os fabricantes também podem achar vantajoso reciclar módulos fotovoltaicos para cumprir com padrões da indústria para melhorar a imagem de sua empresa e aumentar sua competitividade geral no mercado (CURTIS *et al.*, 2021).

Tecnologia, infraestrutura e processos atuais associados à reciclagem de módulos fotovoltaicos não são otimizados para recuperação econômica de alto valor materiais. Como resultado, o custo da reciclagem é muitas vezes mais caro que opções de descarte levando assim à preferência por essa modalidade. Além disso, não existe esquema regulatório para o gerenciamento de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, ainda que exista uma preocupação no continente europeu sobre a reciclagem destes materiais, não é clara e nem formalmente legislada os requisitos ou responsabilidades associadas ao manuseio, transporte, armazenamento, acumulação, tratamento ou reciclagem de módulos fotovoltaicos (ABSOLAR, 2021).

Não há uma determinação específica sobre quais as melhores técnicas e processos de reciclagem devem ser utilizados, há diversas pesquisas na área de recuperação e reaproveitamento de materiais presentes nos módulos FV, tornado as opções bem diversas e impossibilitando uma escolha singular. Nos resíduos eletroeletrônicos, assim como nos

painéis fotovoltaicos, as técnicas de pirometalúrgica e hidrometalúrgica são bastante utilizadas. Tornam-se necessários mais estudos na área, já que existem tecnologias diversas nos sistemas fotovoltaicos e seu crescimento é incipiente (DIAS, 2015).

Até o momento, os mecanismos regulatórios mais comuns para a gestão destes produtos são de responsabilidade estendida de seus fabricantes. Entretanto, ainda é mais econômico e comum o encaminhamento destes resíduos para aterros sanitários.

Este trabalho identificou os tipos de técnicas e processos de reciclagem em potenciais para a reciclagem do módulo solar fotovoltaico de primeira geração, sendo esses os mais representativos no uso dos sistemas fotovoltaicos, como também evidenciou o que de fato já é possível encontrar no mercado sobre os esforços de recuperação e reutilização dos recursos advindos de módulos fotovoltaicos recém-chegados ao final de seu ciclo de vida. Para estabelecer os impactos que os módulos FV de primeira geração irão causar será utilizada a ACV, devido à sua importância no meio empresarial e acadêmico. Além de pesquisa baseada na literatura para os assuntos mencionados anteriormente, foram levantados pontos acerca da legislação nacional e internacional juntamente com uma proposta para implantação da logística reversa no Brasil.

1.1 Justificativa

Como já é de conhecimento o mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil está em grande crescimento. Isso significa que haverá uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos instalados em todo o país, assim como um aumento na sua fabricação. Esses painéis apresentam cerca de 25 a 30 anos de vida útil. Após esse período eles devem ser substituídos e precisarão de uma destinação adequada, caso contrário podem gerar grandes impactos ao meio ambiente, por conta da presença de componentes tóxicos. Além disso, a existência de materiais raros em sua composição torna a reciclagem dos módulos mais atrativa, uma vez que esses materiais não estão sendo repostos no ambiente com a mesma frequência de seu uso. Dessa forma, precisam ser tomadas medidas de prevenção para garantir a sustentabilidade da fonte. Esse trabalho tem em vista apresentar processos de reciclagem que possam ser utilizados nos módulos fotovoltaicos após sua vida útil.

1.2 Objetivo geral

Apresentar os impactos ao meio ambiente causados pela destinação incorreta dos módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil e as principais técnicas e processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos a fim de propor soluções para a gestão dos resíduos no Brasil.

1.3 Objetivos específicos

Apresentar uma síntese sobre os módulos fotovoltaicos, bem como os seus componentes;

Apresentar uma revisão dos principais impactos ambientais ocasionados pelo mau gerenciamento dos módulos fotovoltaicos ao fim de suas vidas úteis;

Exibir legislações específicas relacionadas à gestão e destinação correta dos módulos fotovoltaicos vigentes em outros países;

Propor soluções acerca da gestão dos resíduos fotovoltaicos para o Brasil com base em legislações específicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Módulos fotovoltaicos

A crescente demanda por energia elétrica no mundo traz consigo a busca por opções de fontes alternativas frente aos combustíveis fósseis, como a energia solar, cuja geração está atrelada ao efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Edmond Becquerel (1839) (PRADO, 2018).

No efeito fotovoltaico, os elétrons que são gerados através da exposição à radiação solar no material semicondutor, se deslocam das bandas de valência para as bandas de condução. Dessa forma, se obtém uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos (GHIZONI, 2016).

Soares (2017) afirma que somente, depois de quase 110 anos, em 1950, células fotovoltaicas começaram a ser produzidas e suas tecnologias de fabricação foram evoluindo com o tempo. O mercado de hoje é bastante diverso, abrangendo células mais comuns como as de silício monocristalino e policristalino, até as células multijunção de alta eficiência. Em sua dissertação para obtenção do título de mestre sobre a caracterização e reciclagem de painéis solares, Dias (2015) define:

Uma célula fotovoltaica é definida como um semicondutor no formato de *wafers* estruturado para formar um campo elétrico (positivo de um lado e negativo do outro). Atrelado a esse semicondutor, há condutores elétricos capazes de escoar os elétrons despreendidos. Um conjunto de células fotovoltaicas dispostas numa estrutura é um módulo fotovoltaico (ou painel fotovoltaico) (DIAS, 2015, p.12).

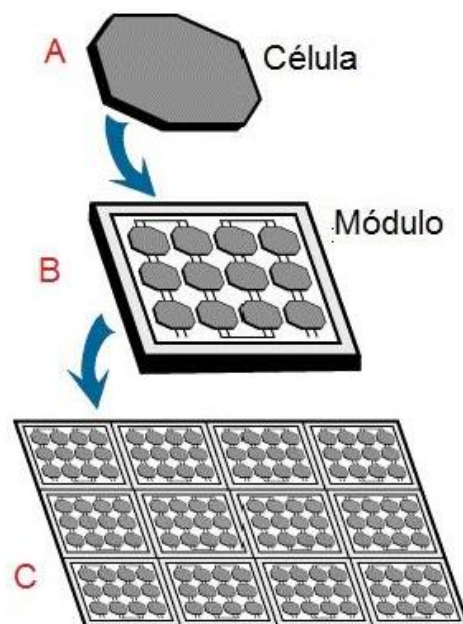
Soares (2017) complementa afirmando que a banda de condução, antes de ser estimulada, não apresenta elétrons e se encontra na temperatura de zero absoluto (0 K), e quando essas bandas são espaçadas por um *gap* (banda proibida), geram uma tensão de até 3 eV (elétrons-volt). Logo, é possível afirmar que o aumento da condutividade elétrica se dá pela excitação térmica nas células fotovoltaicas. Após a transferência dos elétrons, a banda de valência apresenta lacunas, formadas por cargas positivas que têm aproximadamente um terço da motricidade dos elétrons presentes na banda de condução.

Pode-se concluir que sempre que as células fotovoltaicas forem expostas a temperaturas maiores que zero kelvin, elas irão apresentar certa quantidade de elétrons ocupando a banda de condução e a mesma quantidade de lacunas na banda de valência, são os chamados portadores intrínsecos, de acordo com Soares (2017). Nessa situação, enquanto os elétrons ocupam, preferencialmente, níveis de energia disponíveis em regiões mais ao fundo e

só depois ocupam níveis mais acima, as lacunas ocupam os níveis do topo e só depois vão em direção ao fundo da banda de valência. Também pode acontecer da energia absorvida pelos fótons ser superior àquela suportada pelo *gap*, nesse caso parte da energia é dissipada em forma de calor, é o chamado efeito termalização.

Uma melhor caracterização do conjunto de células fotovoltaicas é apresentada na figura 1 a seguir:

Figura 1 - Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B), e um conjunto de módulos fotovoltaicos (C).



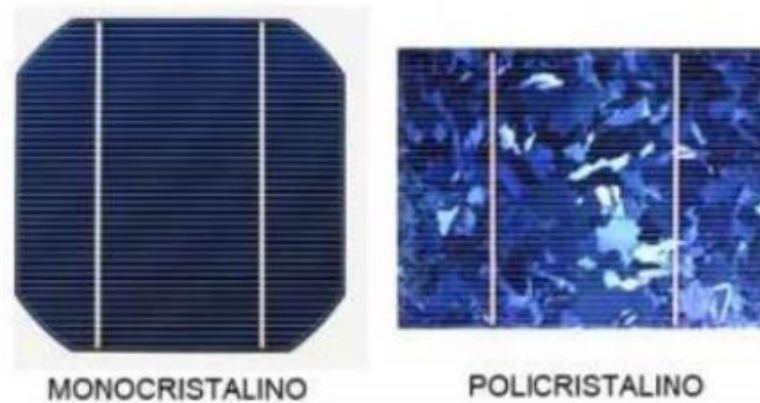
Fonte: Dias (2015).

As células fotovoltaicas não necessitam da radiação solar direta para estar operacional, é o que destaca Ghizoni (2016), ao afirmar que elas também são capazes de gerar eletricidade em dias nublados, onde a radiação solar é reduzida. Porém, no segundo caso, a densidade das nuvens está diretamente ligada à geração elétrica. Também é possível obter uma produção energética maior em dias com poucas nuvens comparados a dias de céu claro, em razão da reflexão sofrida pelos raios solares.

Bettanin (2017) classifica os painéis fotovoltaicos em três gerações. Os módulos de primeira geração são formados por silício cristalino (c-Si), que se divide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), sendo o primeiro considerado o mais eficiente e de maior custo comparado ao silício policristalino, já que sua formação é derivada

de fatias de um único cristal; segundo Ghizoni (2016) seus cristais são considerados homogêneos, pois apresenta poucas imperfeições. Já os módulos de silício policristalino (p-Si) apresentam mais imperfeições, graças a sua formação, ao invés de ser formado por um único cristal como o silício monocristalino, esse é fundido e solidificado. Na figura 2 é possível notar essa divergência entre os módulos da primeira geração.

Figura 2 - Células fotovoltaicas de primeira geração.

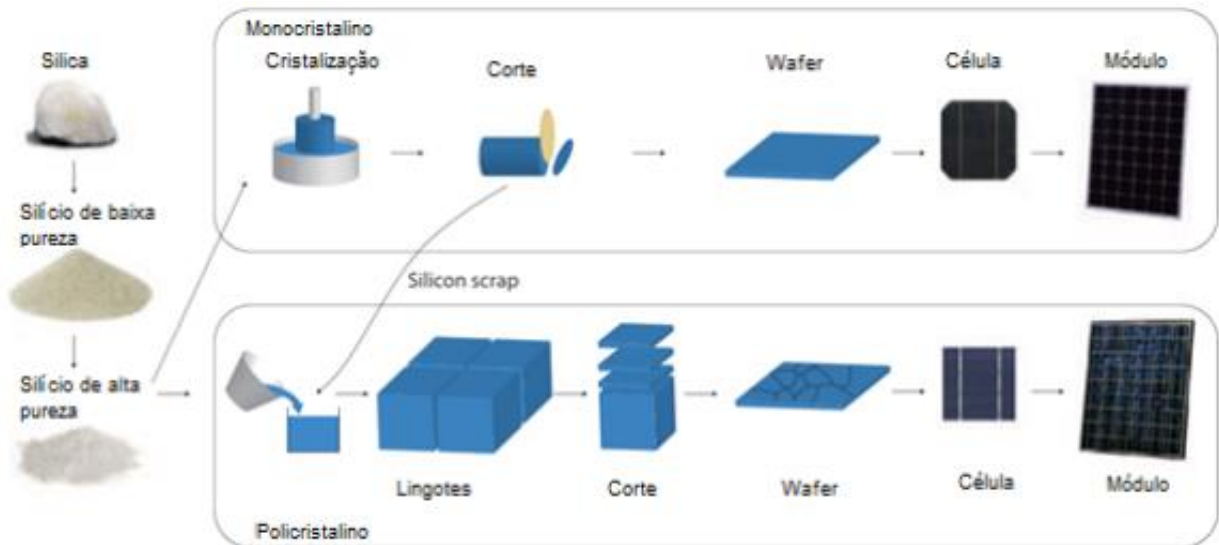


Fonte: Scolla (2020).

Para a produção do silício monocristalino Prado (2018) informa que “os lingotes de silício são obtidos como produto do processo de cristalização Czochralski (CZ), posteriormente são fatiados como *wafers*”. Já na produção do silício policristalino são usados fragmentos e resíduos do corte do silício monocristalino. A figura 3 apresenta de forma sucinta o fluxograma do processamento da sílica.

Entre as principais vantagens desse tipo de módulo podem ser citadas: a abundância do silício mundialmente, poucas consequências ao meio ambiente, apresenta uma eficiência de conversão elevada, é desenvolvida por uma tecnologia consolidada, além disso, esses painéis fotovoltaicos apresentam um longo tempo de vida. De encontro a esses fatores pode-se destacar o custo de purificação do silício (SCOLLA, 2020).

Figura 3 - Fluxograma do processamento da sílica para os módulos fotovoltaicos de primeira geração.



Fonte: Prado (2018).

A segunda geração apresenta diversos materiais, como: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), também possui uma ou mais camadas de material fotovoltaico acima do substrato, como: ácido inoxidável, vidro e plástico. Essa geração é caracterizada pela tecnologia de filmes finos, a qual consome menos matéria-prima e energia durante sua fabricação, além de compreender um menor custo, processos simples e automatizados, facilitando a produção em larga escala. Como desvantagem, essa tecnologia possui uma menor eficiência frente aos módulos de silício monocristalino, ademais é necessária uma atenção especial quanto ao seu destino final, já que apresenta materiais tóxicos em sua composição (GHIZONI, 2016). A seguir é apresentada a figura 4 de um módulo de segunda geração.

Figura 4 - Representação de um módulo de segunda geração.



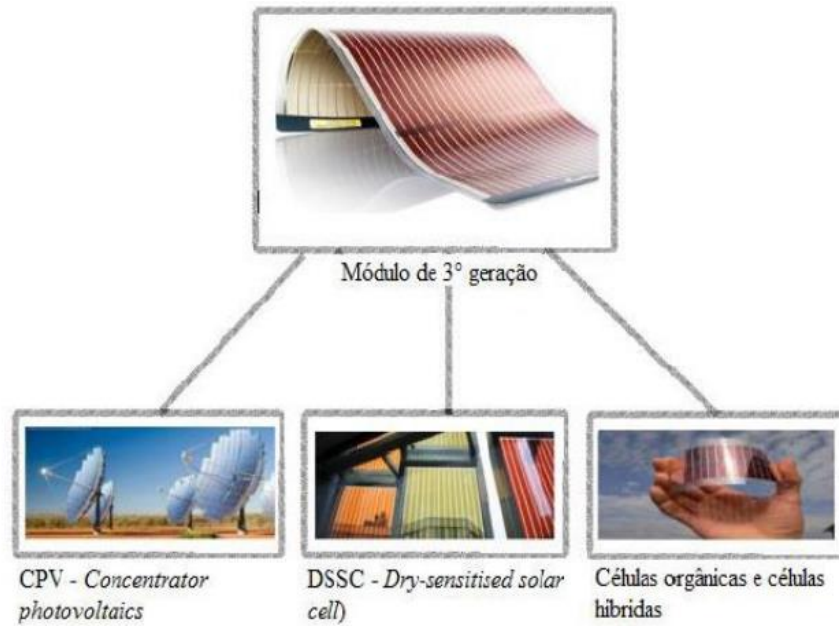
Fonte: Ghizoni (2016).

Segundo Scolla (2020), os módulos de terceira geração são aqueles que apresentam uma utilização com maior eficiência da luz solar, baixo custo e utilizam materiais de baixa toxicidade, alguns exemplos são: os módulos de CPV (concentrador *photovoltaics*), células orgânicas, módulos DSSC (*Dry-sensitised solar cell*), além das células híbridas. Ely *et al.* (2014) complementam que “são células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar que as células baseadas em um único *band-gap* eletrônico”.

O primeiro exemplo faz uso de células de silício ou compostos, além de lentes para focalizar a luz solar com maior facilidade, os módulos DSSC são preparados com materiais orgânicos e inorgânicos, obtendo sua sensibilidade através de corantes (GHIZONI, 2016). Já as células orgânicas apresentam baixo custo tanto em matéria-prima como em produção, são leves, flexíveis e semitransparentes, são formadas por materiais orgânicos como polímeros e fulereno de carbono. Por fim as células híbridas são mescladas por silício cristalino e filmes finos, apresentando fácil preparo nos seus processos químicos de formação, podendo proporcionar uma aplicação em larga escala, em virtude do seu baixo custo e utilização de baixa temperatura (BÜHLER *et al.*, 2018).

Essa última geração tem como objetivo se tornar mais eficiente com os mesmos custos de produção das gerações anteriores (SCOLLA 2020). A seguir a figura 5 apresenta os módulos da terceira geração, bem como sua divisão.

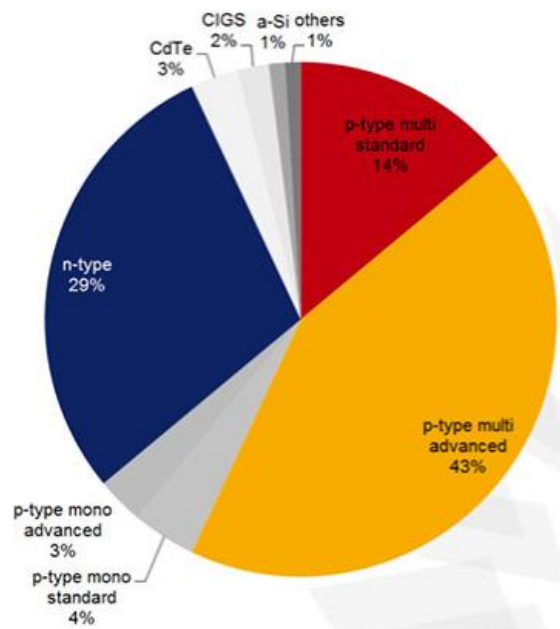
Figura 5 - Módulos fotovoltaicos de terceira geração e suas divisões.



Fonte: Scolla (2020).

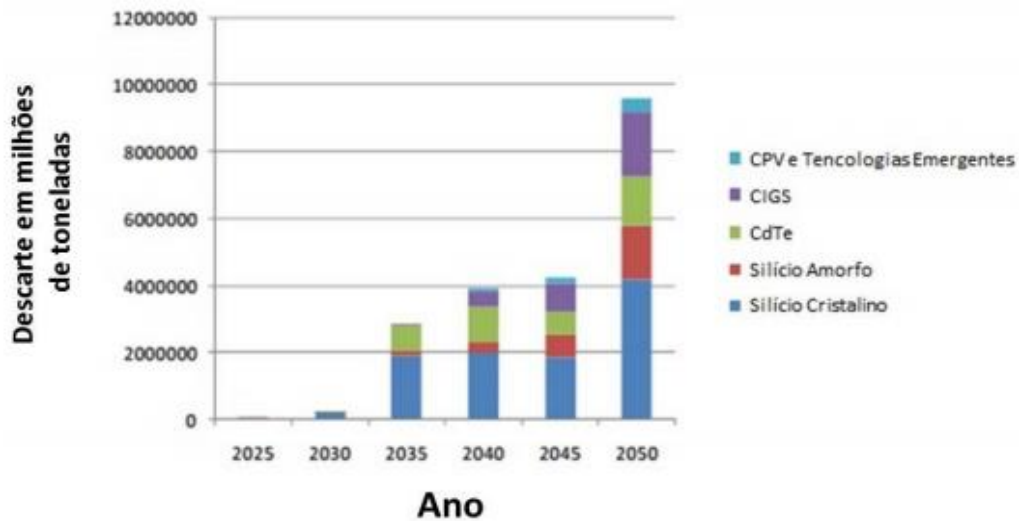
Atualmente, o mercado de módulos fotovoltaicos é repleto principalmente por módulos de primeira geração, logo a tendência é que num futuro próximo os resíduos eletrônicos desse meio sejam formados principalmente por painéis fotovoltaicos de silício (DIAS, 2015). Nas figuras 6 e 7 é possível notar essa tendência e a atual distribuição dos módulos.

Figura 6 – Fabricação de painéis FV em 2020.



Fonte: Portal Solar (2020).

Figura 7 - Gráfico da projeção da distribuição de materiais no resíduo eletrônico, por tipo de tecnologia dos módulos fotovoltaicos, em milhões de toneladas.



Fonte: Dias (2015).

Dias (2015) mostra que na comparação entre a primeira e a segunda geração, a tecnologia de silício cristalino apresenta um maior potencial, porém com o avanço tecnológico essa diferença tende a diminuir com o tempo, e a tendência é que a tecnologia de segunda geração ultrapasse a primeira.

2.1.1. Composição dos módulos de silício cristalino

O presente trabalho irá focar nos módulos de primeira geração, já que essa apresenta a tecnologia mais consolidada e é a mais empregada atualmente a nível mundial, logo serão as responsáveis pela maior parte dos resíduos da energia solar (BETTANIN, 2017).

Os módulos de silício cristalino são formados por diversos componentes, indo da camada superior (superfície voltada para o Sol durante seu funcionamento) até a camada inferior (superfície voltada para o solo durante seu funcionamento) primeiro se encontra o vidro temperado (soda-cal) responsável por fornecer resistência mecânica e transparência ótica, posteriormente se encontra duas camadas de um material polimérico isolante, chamado de encapsulante, representa o material semicondutor, entre essas camadas se encontram a célula fotovoltaica (PRADO, 2018).

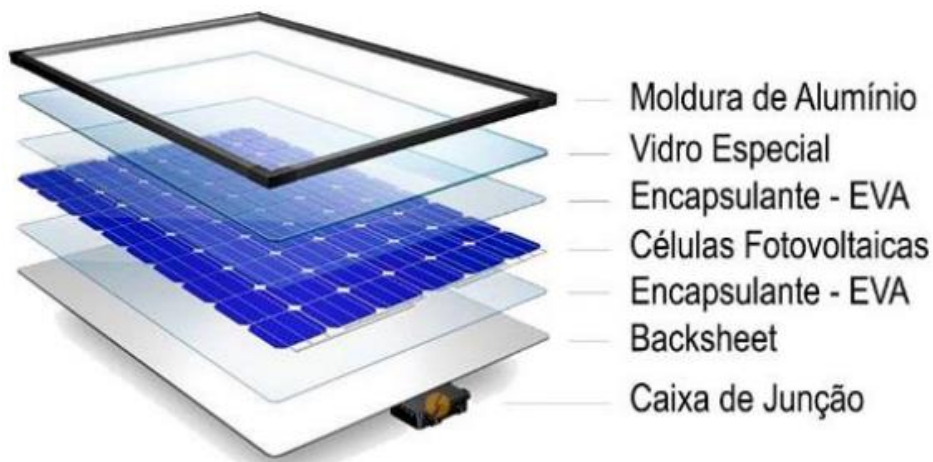
Ghizoni (2016) complementa essas informações ao declarar que o vidro temperado usado nos módulos fotovoltaicos são ultrapuros e apresentam um baixo teor de ferro, além

disso, eles são fabricados de forma que reflita a radiação solar, para assim permitir a sua maior passagem através dele. Quanto ao material encapsulante, ele é conhecido como EVA (*Ethylene Vinyl Acetat*), o qual é o responsável por proteger o módulo fotovoltaico contra o envelhecimento que pode ser causado por alguns fatores naturais como a temperaturas extremas, umidade e até mesmo os raios UV.

Entre as células fotovoltaicas e o encapsulante ainda se encontram contatos metálicos de cobre recobertos por chumbo e estanho, responsáveis pela conexão elétrica entre as diversas células fotovoltaicas presentes nos painéis. Logo abaixo da segunda camada do encapsulante está o *backsheet*, ele é composto, geralmente, por Tedlar/PET/Tedlar (TPT), que corresponde a 70% do encontrado no mercado, Poliamida/PET/Poliamida (APA), responsável por 10% do mercado, ou Tedlar/PET/Poliamida (TPA) (PRADO, 2018).

O *backsheet* é incumbido de proteger os componentes internos do módulo, além de agir como um isolante elétrico. Para finalizar, ao redor do módulo fotovoltaico há uma moldura, geralmente de alumínio, proporcionando resistência e leveza para a estrutura final do painel fotovoltaico e para selar a interface entre o vidro e a moldura são usados frequentemente seladores de silicone ou polibutil (GHIZONI, 2016). Como é apresentada na figura 8.

Figura 8 - Estrutura dos materiais usados na fabricação de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Ghizoni, 2016.

A tabela 1 apresenta a distribuição dos materiais que compõem um módulo fotovoltaico c-Si.

Tabela 1 - Composição relativa de um módulo fotovoltaico de c-Si.

Componente	Poncentagem [%]
Vidro (com 0,01-1% Antimônio/kg de vidro)	70
Moldura de alumínio (Al)	18
Encapsulante (EVA)	5,1
Célula Solar (C-Si)	3,65
<i>Backsheet</i> (PVF)	1,5
Cabos (Cu e polímeros)	1,0
Condutor interno (Al)	0,53
Condutor interno (Cu)	0,11
Prata (Ag)	0,053
Outros metais (Sn, Pb)	0,053
Total	100

Fonte: Adaptado de Prado (2018).

Na superfície do semicondutor há os *fingers*, que são formados geralmente por prata e desempenham a função de coletar os elétrons fotogerados que estão presentes no semicondutor. Para este fim, a prata é usada em 90% dos módulos de silício cristalino, graças às suas propriedades como condutividade, reflexão da luz e resistência à corrosão. Os *fingers* são adicionados através de um processo térmico, chamado *firing*, de uma pasta de solda contendo prata, ou chumbo, recentemente tem sido utilizado também pastas *lead-free* (PRADO, 2018).

Prado (2018) apresenta também informações acerca da quantidade de prata presente nos módulos fotovoltaicos, ao afirmar que a literatura apresenta valores divergentes, devido à inconsistência em informar quais os materiais dos módulos foram considerados ao realizar essa quantificação. Esses valores variam entre 0,006 e 0,1239% de prata em massa.

Segundo Prado (2018) após a fabricação do silício cristalino, a deposição da prata dos módulos é o processo mais caro e crítico. Por isso, tamanho é o interesse por reduzir o seu consumo, já que seu preço em 03 de Junho de 2021 era de US\$892/kg (SILVER, 2021). Hoje em dia é estimado pelos produtores que o consumo da prata é de 10g/m² por painel fotovoltaico, sendo o uso da prata não limitado apenas aos módulos de primeira geração (BETTANIN, 2017).

A composição dos materiais que são usados em algumas tecnologias de primeira e segunda geração é apresentada na tabela a seguir. Confirmando a divergência das quantidades de prata nos módulos na literatura.

Tabela 2 - Composição dos módulos fotovoltaicos de primeira e segunda geração.

	Proporção [%]			
	c-Si	a-Si	CIS	CdTe
Vidro	74	90	85	95
Alumínio	10	10	12	<0,01
Silício	3	<0,1	0	0
Polímeros	6,5	10	6	3,5
Zinco	0,12	<0,1	0,12	0,01
Chumbo	<0,1	<0,1	<0,1	<0,01
Cobre	0,6	0	0,85	1
Índio	0	0	0,02	0
Selênio	0	0	0,03	0
Telúrio	0	0	0	0,07
Cádmio	0	0	0	0,07
Prata	<0,006	0	0	<0,01

Fonte: Adaptado de Dias (2015).

Foi possível notar a presença de alguns metais raros na composição dos módulos fotovoltaicos. Na tabela 3 esses metais são apresentados juntamente com seu valor econômico, além dos fatores que justificam sua valorização e interesse por sua reciclagem nos módulos.

Tabela 3 - Metais raros encontrados nos módulos fotovoltaicos e os fatores que contribuem para a valorização econômica desses metais nos módulos fotovoltaicos.

Metais raros	Tipo de módulo fotovoltaico	Estoque natural atual	Possibilidade de continuação de produção na taxa atual	Estimativa de demanda no futuro	Volatilidade no preço	Taxa de reciclagem atual
Prata (Ag)	c-Si	Muito limitado	13 anos (a partir de 2008)	Aumento significativo	Alta	30 a 50%
Índio (In)	a-Si, CIS, CIGS	Consideravelmente limitado	19,3 anos (a partir de 2007)	Leve aumento	Médio	Limitado. Em desenvolvimento
Gálio (Ga)	CIGS, CPV e tecnologias emergentes	Praticamente ilimitado (limitação na extração e processamento)	9000 anos	Aumento significativo	Médio	20%
Germânio (Ge)	a-Si, CPV e tecnologias emergentes	a-Si, CPV e tecnologias emergentes	Sem informação	Leve aumento	Baixo	30%

Fonte: Adaptado de Bettanin (2017).

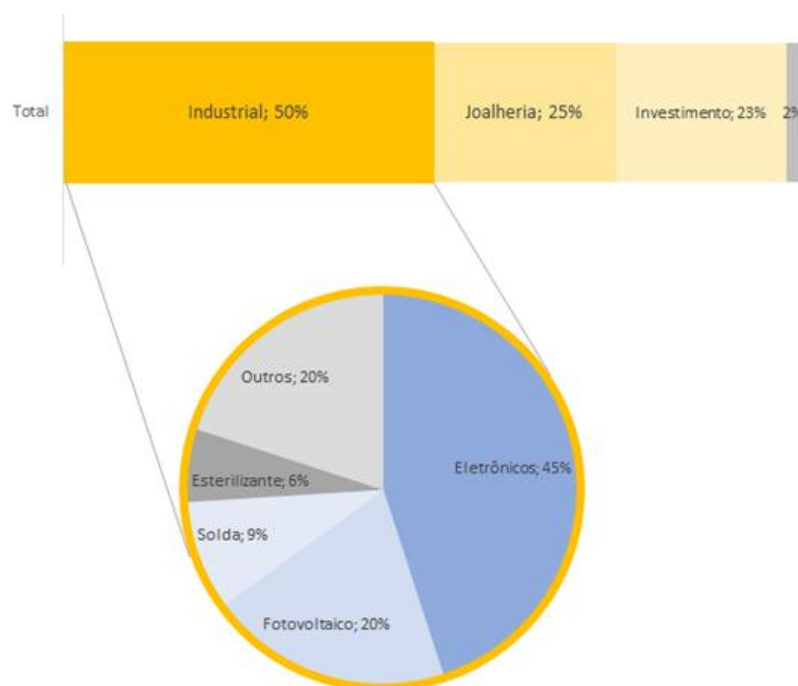
Pelo elevado preço da prata os fabricantes optam por usar *busbars*, com o objetivo de reduzir o valor do módulo fotovoltaico, conforme Prado (2018). Elas são fitas de metais que apresentam um menor valor no mercado, são compostas por estanho e chumbo. Cerca de 6-10% de toda a área de uma célula solar é composta por *fingers* e *busbars* (LIN, 2011).

Segundo Bettanin (2017), a prata apresenta um alto valor econômico, além disso, pode ser encontrada na natureza de diversas formas, tanto pura quanto ligada a outros elementos. Entre as principais fontes da prata podem-se citar minas de cobre, cobre-níquel, chumbo e chumbo-zinco, nesses exemplos a prata se destaca como sendo um subproduto dos seus processos de mineração, já nas minas de ouro, a prata é obtida na forma de liga com este metal.

O uso desse tipo de tecnologia fotovoltaica para satisfazer a demanda energética mundial faz o ser humano substituir a sua dependência por combustíveis fósseis pela ânsia em obter minerais e materiais que são indispensáveis para tal tecnologia, como a prata, é o que afirma Bettanin (2017). Esse metal apresenta uma demanda mundial de aproximadamente 35.000 toneladas, destes 65% é oriundo de minérios, e aproximadamente 34% provêm da reciclagem de jóias e outros processos industriais.

Bettanin (2017) expõe algumas aplicações da prata atualmente, uma das principais é na indústria eletrônica, pela sua condutividade elétrica, mas existem também outras aplicações em menor quantidade, na figura 9 é possível avaliar as diversas aplicações da prata.

Figura 9 – Aplicações da prata.



Fonte: Ação Brasil (2020).

Pelo fato do mercado de energia fotovoltaica estar numa crescente e se o uso da prata continuar da mesma forma, sua quantidade por painel deverá diminuir para que a matéria-prima necessária para estas aplicações possa ser atendida, conforme Bettanin (2017). A demanda anual da prata também está em crescimento, até mesmo maior que o recurso mineral, por isso a importância da reciclagem desse material.

Em seu trabalho, Bettanin (2017) mostra que o teor médio da prata em minérios apresenta uma queda de 38% entre 2005 e 2012, em paralelo sua produção vem aumentando constantemente. A tabela 4 apresenta a classificação dos minérios baseada nas suas concentrações, no caso os módulos fotovoltaicos se enquadram como uma fonte de prata de alta concentração do material.

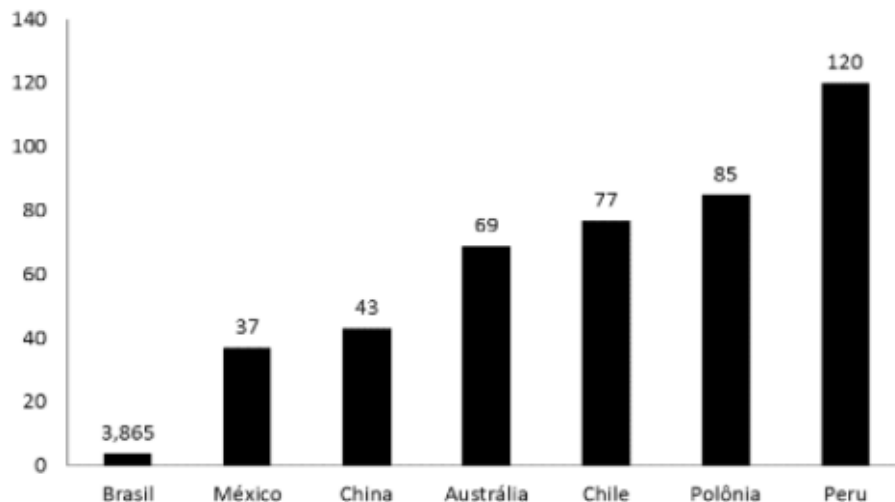
Tabela 4 - Classificação do minério de prata segundo sua concentração.

Classificação	Concentração [%]
Alta (Rich Silver)	0,01 - 0,006
Média (High Grade)	0,0011 - 0,0008
Baixa (Low Grade)	0,0001 - 0,00008
Muito baixa (Ultra Low Grade)	0,00001 - 0,000008

Fonte: Bettanin (2017).

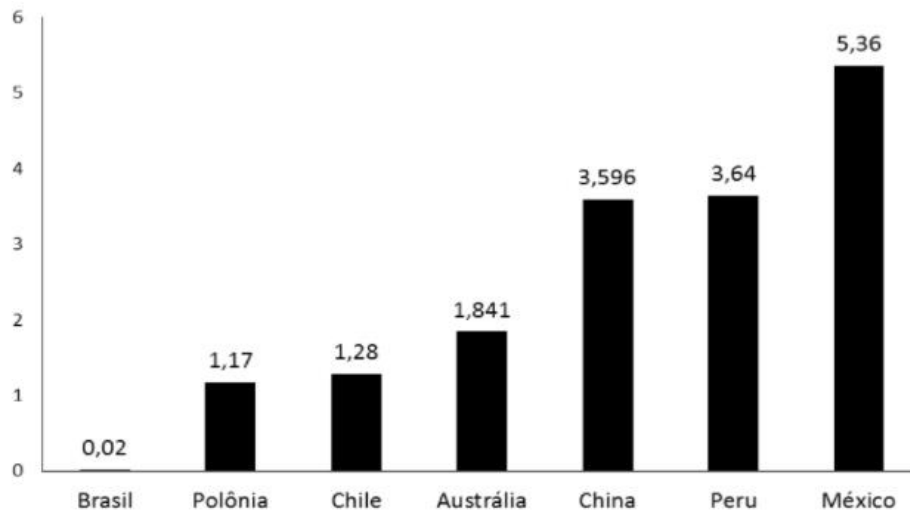
Dias (2015) complementa essas informações, afirmando que para a extração da prata ser economicamente viável nos Estados Unidos, o minério deve ter uma concentração mínima de 700 g/t. O que não é aplicável na prática, já que, geralmente, a prata é encontrada junta a outros metais de interesse como chumbo, cobre e ouro, nesses casos ela se torna viável, pois é considerado o valor econômico de todos os metais. Sendo esse o caso da mineração brasileira, que apresenta prata em baixas concentrações. Como é possível notar nas figuras 10 e 11.

Figura 10 – Média das reservas mundiais de prata em 10³ton.



Fonte: Núcleo do conhecimento (2018).

Figura 11 - Média da produção mundial da prata em 10³ton.



Fonte: Núcleo do conhecimento (2018).

2.2 Panorama mundial

Os sistemas fotovoltaicos não produzem quaisquer resíduos ou emissões durante a produção de eletricidade. Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos devem ser fabricados, instalados e desmontados novamente ao final de sua vida útil, o que impacta o meio ambiente. A reciclagem de módulos FV ainda não foi tão importante para instituição de pesquisa e empresas industriais (STRACHALA *et al.*, 2017).

Com base no rápido crescimento da capacidade de geração fotovoltaica instalada, é possível propor que o número de painéis exigirá uma estratégia para reciclagem e recuperação que precisam ser estabelecidas até 2040. As emissões de CO₂ também poderiam ser reduzidas pela reciclagem de resíduos fotovoltaicos, que consequentemente, representam um impacto positivo substancial sobre o meio ambiente (CHOWDHURY *et al.*, 2019).

As políticas e tecnologias necessárias para a reciclagem de sistemas fotovoltaicos estão atualmente em rápido desenvolvimento. Devido às modificações no resíduo eletrônico europeu, sancionada pela diretiva de equipamentos eletrônicos (WEEE 2012/19/ EU) em 2012, a retirada e reciclagem de módulos fotovoltaicos são, de fato, já obrigatórios na Europa. A reciclagem é atualmente realizada em pequenas quantidades, mas que aumentam anualmente (IEA, 2017).

Mesmo que o tratamento de resíduos seja considerado parte do ciclo de vida de um módulo, apenas alguns inventários do ciclo (de energia e fluxos de materiais) estão

disponíveis para os processos de reciclagem industrial que são usados hoje para reciclar módulos fotovoltaicos baseados em silício cristalino (c-Si). Para ajudar o progresso da indústria, uma pesquisa com recicladores europeus foi realizada pela IEA (2017) para caracterizar a reciclagem comercial já existente, a mesma mapeou os processos e compartilhou dados de inventários de ciclo de vida relacionados.

Tabela 5 – Resumo dos recicladores que participaram do estudo.

Empresa	País	Processo	Tipo de material reciclado	Volume de tratamento anual (ton/Ano)
<i>Anonymous</i>	Alemanha	Mecânico	Vidro	1.200
<i>Exner Trenntechnik GmbH</i>	Alemanha	Mecânico	Metal	100 - 250
<i>Maltha</i>	Bélgica	Mecânico	Vidro	1.000
<i>Nike</i>	Itália	Mecânico	Vidro	600

Fonte: Adaptado de IEA (2017).

Todos usam processos mecânicos para separar os componentes do módulo, tais processos incluem: britagem, peneiramento e separação de metais. O vidro obtido pode ser usado para a produção de espuma ou fibra de vidro, enquanto os metais que são extraídos durante o processo podem ser vendidos para recicladores e fundidores de metal (IEA, 2017).

A vida do sistema fotovoltaico é longa e o número de módulos a serem reciclados ainda é baixo - apenas algumas centenas de toneladas por ano em toda a União Europeia. A quantidade de resíduos fotovoltaicos pode ser estimada em cerca de 100000-545000 toneladas na República Tcheca até 2025 (KUMAR *et al.*, 2013).

Existem duas abordagens para a reciclagem - reciclagem de módulos fotovoltaicos, independentemente da tecnologia de produção e modificações de *design* para facilitar a reciclagem. Uma tarefa desafiadora é desenvolver tecnologia de reciclagem ideal para financiar seus altos custos de investimento (STRACHALA *et al.*, 2017).

Particularmente na China, há uma falta de regulamentação sobre reciclagem de painéis solares. Além disso, na Ásia, os países devem ajudar a proteger seus ambientes naturais, desenvolvendo um ambiente industrial de reciclagem amigável e aplicação de regulamentos para encorajar reprocessamento e eliminação segura de resíduos (CHOWDHURY *et al.*, 2019).

2.3 Panorama brasileiro

O cenário brasileiro ainda é escasso quanto a variedade em empresas que atuam exclusivamente na reciclagem de módulos fotovoltaicos, todavia, a *SunR* é a primeira empresa da América Latina a atuar no setor de reciclagem. A tecnologia básica utilizada na empresa brasileira foi desenvolvida na Europa, precursora da indústria fotovoltaica, onde há muitas décadas já se faz a reciclagem desses materiais (CANAL SOLAR, 2020).

A ideia de trazer esta tecnologia para o Brasil surgiu a partir de um estudo de mercado. Nossa proposta é solucionar o problema ambiental, atrelado ao descarte de módulos fotovoltaicos, e garantir que a energia fotovoltaica se torne, de fato, uma solução sustentável. [...] nossa meta é oferecer soluções de logística reversa, coleta e reciclagem dos módulos brasileiros. (CANAL SOLAR, 2020).

Esta realidade também é proporcionada pela empresa ALDO que desde 2013 é a maior distribuidora de equipamentos de TI e Energia Solar do país, e já reciclou mais de 62 toneladas de equipamentos eletrônicos. Através do programa “ALDO *Crazy Recicla*” a empresa ajuda empresas correlatas do setor a dar a destinação correta para resíduos sólidos eletroeletrônicos. Deste modo as revendas encaminham o lixo eletrônico para a ALDO, que se responsabiliza pela separação, transporte e destinação final dos resíduos (ALDO, 2020).

Nós sempre fizemos questão de conhecer bem os materiais e produtos com que trabalhamos. Por isso, nos informamos, também, sobre como o descarte irregular deste material, ao fim da sua vida útil, pode ser perigoso. Assumir a responsabilidade pelo descarte correto é, para nós, a maneira com que pensamos nosso trabalho e nosso propósito (ALDO, 2020).

Entretanto, ainda que já exista mercado, não existe legislação específica sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/10) sugeriu o uso da logística reversa de REEE e definiram objetivos e metas a fim de evitar à destinação incorreta desses resíduos aos aterros de lixo convencional, com o intuito de acabar com essa modalidade de rota (PRADO, 2018).

A NBR 16156 de 2013, denominada “Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – Requisitos para atividade de manufatura reversa” delimita condições para mitigar os impactos ao meio ambiente durante e após a realização do processo reverso de resíduos eletroeletrônicos (PRADO, 2018).

As linhas de tendências e projeções estatísticas evidenciam que o fluxo de resíduos de células fotovoltaicas aumentará drasticamente nos próximos anos. O assunto já foi debatido em alguns países e os mesmos já passaram a gerir com maior eficácia o final de vida destes módulos. Entretanto, infelizmente nenhuma lei ou norma atualmente se encontra

vigente e especifica claramente o enquadramento dos resíduos tecnológicos quanto à sua origem, natureza e periculosidade no Brasil (MIRANDA *et al.*, 2019).

2.4 Impactos

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelos leilões de energia, exige a apresentação de uma documentação de licença ambiental, seja de licença prévia, instalação ou operação dos empreendimentos fotovoltaicos. Para isso é necessário a realização da avaliação dos impactos, para detectar os efeitos que podem causar ao meio ambiente pelas ações do empreendimento solar, bem como a relação de causa e efeitos e propostas de medidas mitigadoras, para assim garantir a sustentabilidade do empreendimento (SOARES, 2017).

Em seu trabalho para conclusão de curso Soares (2017) define os impactos ambientais como:

quaisquer alterações das características do sistema ambiental, sejam estas físicas, químicas, biológicas, sociais ou econômicas, causadas pelas ações de empreendimentos, as quais possam afetar direta ou indiretamente o comportamento dos parâmetros que compõem os meios físico, biótico e socioeconômico do sistema ambiental na sua área de influência (SOARES, 2017, p.27).

Segundo Soares (2017) quando o empreendimento apresenta uma potência nominal de no máximo 5 MW não são exigidas licenças ambientais pela ANEEL. Geralmente esses casos se enquadram como geração distribuída, porém em algumas situações pode-se encontrar grupo de minigeradores, que podem chegar a menos de 5 MW, cujas áreas ocupadas podem ter impactos ambientais significativos.

São do conhecimento que apesar de ser uma fonte de energia renovável, os sistemas fotovoltaicos podem causar impactos ambientais durante sua produção, implantação e fim de operação (SOARES, 2017). Ele não emite poluente durante sua operação, porém existem alguns impactos ambientais causados por ele, de acordo com Costa *et al* (2019), pode-se citar: emissão de poluentes nos processos de fabricação, transporte e manutenção desses sistemas, emissão de produtos tóxicos durante o processo de matéria-prima focada na produção dos módulos e de seus componentes periféricos, perda de habitat, impactos visuais, além dos riscos associados aos materiais tóxicos que são utilizados como gálio e cádmio.

Durante o processo produtivo das células solares fotovoltaicas de silício cristalino há a emissão de gases como CO₂, SO₂ e NO_x, dessa forma através da reciclagem é possível reduzir a emissão de tais gases já que serão aproveitadas as células de outros módulos,

diminuindo sua necessidade produtiva (SOARES, 2017). Na tabela 6 é apresentada algumas etapas do processo produtivo dos módulos de silício policristalino, bem como suas respectivas emissões.

Tabela 6 - Emissões durante a produção de módulos fotovoltaicos de silício policristalino.

Etapa do Processo/Material	Rejeitos	
Mineração e Refino	Cinza respirável	X-Sílica
Redução de SiO ₂ para Silício Etapa do processo/material	CO ₂ SiO ₂	H ₂ O SO ₂
Produção de Silício de Alta Pureza	Pó de Si SiO ₂ CaCl ₂ NaCl	F contendo cinza Cl contendo cinza CO ₂
Moldagem/Corte/Bolacha	Si contaminado Si (perdas contaminadas) Gás Argônio Óleo Mineral	Si (em óleo mineral) SiC Fluidos de Limpeza
Serigrafia/Texturização	Na ₂ SO ₄ KCl	NaNO ₃
Formação do Emissor	NaHPO ₃ NaOCl NaF	CaF ₂ CO ₂
Metalização	Solventes evaporados	CO ₂ H ₂ O
Passivação/ARC	N ₂ Isopropanol Água (g)	TiO _x (na água) TiO _x (s)
Produção do Módulo	Células rejeitadas Perdas de cortes de EVA Módulos rejeitados	Adesivo Silício Produtos de Reticulação
Moldura	Elastrômero de Polissulfureto	

Fonte: Adaptado de Soares (2017).

As emissões de produtos tóxicos ainda durante o processo da matéria-prima, além dos riscos que estão associados aos materiais tóxicos como o arsênio, gálio e cádmio, são os principais impactos ambientais ocasionados pela energia solar, de acordo com Takii (2019). A autora também afirma que cada processo de fabricação de um módulo fotovoltaico apresenta suas particularidades como necessidades energéticas e riscos ambientais distintos. Soares (2017) complementa:

substâncias tóxicas aos seres humanos e ao meio ambiente são liberadas no ciclo de vida dos módulos, como fluoreto, nitrato dióxido de enxofre, além daquelas que influenciam no aquecimento global, como o dióxido de carbono e que prejudicam a camada de ozônio, como o isopropanol e os solventes (SOARES, 2017, p.30).

Takii (2019) apresenta como exemplos os fornos utilizados para a redução do silício que consomem grande quantidade de combustíveis fósseis, gerando gases e poluição, o pó da sílica que pode provocar doenças às pessoas que o manipulam, além dos outros componentes dos módulos fotovoltaicos como o alumínio e os fios de cobre que também apresentam seus impactos negativos ao ambiente. Em linha, Steiner (2020) complementa dizendo que os resíduos tóxicos presentes nos módulos fotovoltaicos podem ocasionar contaminação do solo e até mesmo do ar atmosférico.

Vale ressaltar que a fabricação dos módulos fotovoltaicos exige o uso de muita energia e materiais como metais, vidro, plástico e água. Mesmo diminuindo esses impactos ambientais e sociais, a crescente da energia fotovoltaica acarretará em diversos impactos quanto à emissão de gases do efeito estufa e uso do solo. Logo, para melhorar essa prospecção futura deve-se identificar, avaliar, planejar e mitigar as consequências desses impactos (ANSELMO, 2019).

Em suma, os impactos referentes ao meio ambiente vão desde alterações da paisagem local até alterações morfológicas e instabilidades temporárias da superfície, sendo que esses impactos podem ser gerados sobre os componentes bióticos, abióticos ou antropológicos. Além disso, para a instalação das placas fotovoltaicas o terreno deve ser limpo, ou seja, a vegetação é completamente removida, afetando a cobertura vegetal, risco de acidentes e danos aos animais (SOARES, 2017).

2.5 Reciclagem

Gil *et al* (2019) definem a reciclagem como “uma via para reduzir a procura de matérias-primas primárias ao gerar fluxos secundários de materiais”.

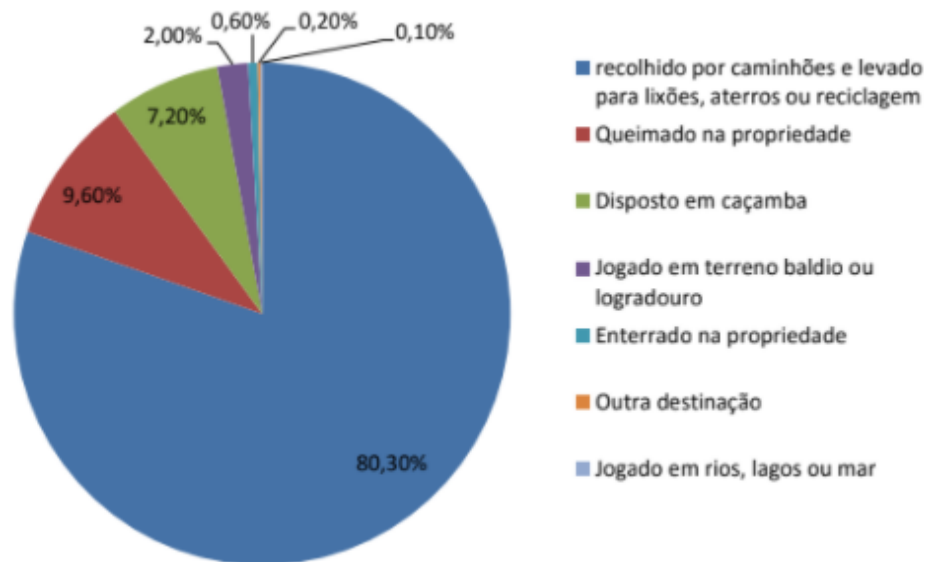
Dias (2015) complementa essa definição “[...] a reciclagem é o ato de fechar o ciclo de um material. Ao final da vida útil do material, há duas rotas básicas que este pode tomar, ele pode ser descartado ou reciclado. Ao reciclar, converte-se o produto já utilizado (lixo) em matéria-prima para criação de outros produtos [...]”. Porém a reciclagem em larga escala só acontece quando os custos para reciclar o material são menores que a sua produção a partir dos seus recursos naturais, como minérios, deve ser destacado que, em muitos casos, o material que será reciclado é mais puro (concentrado) que a própria matéria-prima primária.

Geralmente as taxas de reciclagem dos metais são bem mais elevadas do que as dos polímeros e cerâmicos, é o que afirma Dias (2015). O autor também cita alguns fatores que

podem influenciar nessas taxas, são elas: a toxicidade do resíduo, a facilidade da coleta, a heterogeneidade e as tecnologias dos processos de reciclagem.

Segundo Dias (2015), em 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) “Essa política enfatiza a ideia de redução, reuso e reaproveitamento dos resíduos e é um marco regulatório na área de resíduos.” Entre as mudanças causadas pode-se citar: incentivos financeiros aos municípios e estados pela união para o planejamento e gerenciamento de resíduos, implementação da logística reversa e o fim dos chamados “lixões”. A figura 12 apresenta o destino dos resíduos no Brasil.

Figura 12 - Destino dos resíduos sólidos no Brasil.



Fonte: Dias (2015).

A ABNT NBR 10004 (2004) define os resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004 p.1).

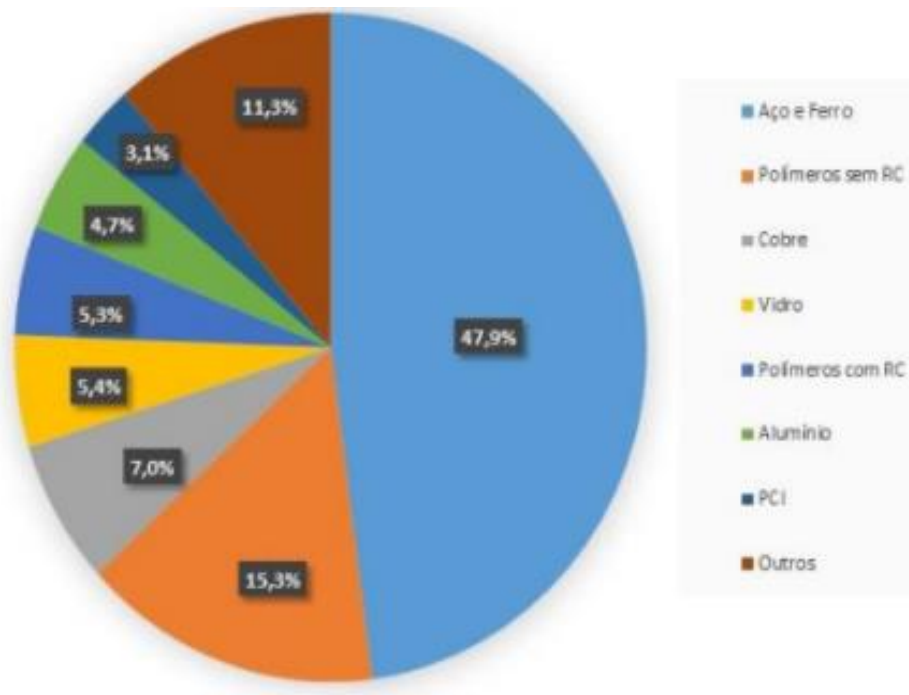
Com sua ampla definição a ABNT considera também os REEE como resíduos sólidos. Conhecidos como REEE, os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, tem sua origem de equipamentos eletrônicos diversos como computadores, celulares, etc, e também incluem os equipamentos usados de forma mais restrita como equipamentos hospitalares e os painéis fotovoltaicos. No Brasil a caracterização e quantificação destes resíduos são complexas, pois no país há várias entidades envolvidas na dispersão dos

equipamentos eletroeletrônicos, atrelado a isso, a ausência de uma política pública bem estruturada acerca da coleta e reciclagem juntamente com a falta de dados confiáveis sobre o assunto causa um verdadeiro descaso com a situação (DIAS, 2015).

Dias (2015) também expõe que houve um crescimento de 26% na geração de REEE entre 2006 e 2009, totalizando 442,5 mil toneladas no último ano mencionado, isso contabilizando apenas televisores, geladeiras, celulares e computadores. Incluindo outros itens como freezers, máquinas de lavar roupa e aparelhos de som, resultaram em aproximadamente 709 mil toneladas em 2008.

Há uma grande diversidade de materiais presentes nos REEE, fato que dificulta a generalização de sua composição, geralmente seus materiais são divididos em cinco categorias: metais ferrosos, metais não ferrosos, vidro, polímero e outros. A figura 13 apresenta a distribuição média de materiais presentes nos REEE (DIAS, 2015).

Figura 13 - Distribuição média dos diferentes tipos de materiais presentes nos REEE.



Fonte: Dias (2015).

Os módulos fotovoltaicos são classificados como um resíduo eletrônico, de classe I considerados perigosos (STEINER, 2020). O Brasil está na primeira posição em produção de resíduos eletrônicos da América Latina, e mundialmente se encontra na sétima colocação. Porém o país não detém hábitos ou legislação destinada ao descarte correto desses materiais, prejudicando o meio ambiente. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída em 2010, estimula que as empresas do setor tecnológico se tornem responsáveis pelos seus próprios

resíduos, assim várias empresas criaram postos de coleta destes lixos, é a chamada logística reversa. De encontro a iniciativa, nem todos os consumidores procuram os postos de coleta, gerando altos números de descarte indevido de resíduos eletrônicos (PUPIN, 2019).

Em linha com o apresentado, o descarte correto dos módulos fotovoltaicos conta com o usuário, se responsabilizando por levar os painéis ao fim da sua vida útil para o fabricante ou distribuidor, e este se compromete com a reciclagem e/ou reutilização dos materiais (PUPIN, 2019).

Em média, os módulos fotovoltaicos apresentam seu fim de vida após 25-30 anos de operação, quando apresentam cerca de 80% de eficiência nominal. Depois desse período sua eficiência cai consideravelmente, entre os principais processos degradativos, pode-se citar: a erosão da superfície de vidro, a degradação fotoquímica oxidativa do encapsulante, a difusão de cátions/ânions pela fase polimérica e a corrosão dos contatos (PRADO, 2018).

Até mesmo países mais desenvolvidos já enfrentaram dificuldades devido à falta de conhecimento acerca dos resíduos fotovoltaicos, é de grande importância aprender as melhores formas de descarte desses produtos ou como reciclá-los (STEINER, 2020).

O estimado é que, em 2035, haja cerca de um milhão de toneladas de módulos solares descartados. A reciclagem desses materiais é uma alternativa importante econômica e ambientalmente, além de reduzir os gastos com a produção dos equipamentos (BENEVIT *et al.*, 2014).

De acordo com Steiner (2020) os processos de recuperação dos módulos fotovoltaicos variam a partir de conceitos químicos, físicos, térmicos ou através de laser. Já existem empresas responsáveis por esse ramo de recuperação de materiais como plástico, vidros e metais, uma delas especializada em módulos da segunda geração apresenta uma taxa de recuperação de 90% para vidros e 95% para os materiais semicondutores. Algumas delas estão no Brasil, entre elas a primeira empresa que atua nesse ramo na América Latina, tendo em média um aproveitamento de 90% dos painéis fotovoltaicos (STEINER, 2020).

Segundo Pupin (2019), para realizar a reciclagem dos módulos fotovoltaicos existem várias opções, um dos métodos seria um processo térmico para separação dos seus componentes, uso de laser ou tratamento químico para a purificação da célula para retirar a camada antirreflexo e as junções metálicas, que geralmente são de cobre ou prata, e apresentam um grande valor econômico. A lixiviação e a pirólise são alguns exemplos de tratamento químicos realizados para a remoção dos componentes que não fazem parte da célula, sua escolha depende das próximas etapas de recuperação. De acordo com Pupin (2019) “Cada um é recomendado de acordo com as etapas que procedem a recuperação dos materiais,

como por exemplo a remoção do vidro através de processos químicos impede o aproveitamento direto das células por pirólise devido à sua mudança de características físicas para este processo”.

Após o silício ser separado ele pode ser reaproveitado em um novo módulo fotovoltaico, graças aos processos de cristalização por Siemens ou Czochralski, dependendo do painel que será fabricado, reduzindo as emissões de CO₂. Quanto ao alumínio, polímeros e o vidro, materiais de interesse financeiro, podem ser levados à reciclagem após suas respectivas separações, para que ocorra um aproveitamento deles sem a imposição da extração de seus recursos primários (PUPIN, 2019).

Segundo Prado (2018), a recuperação dos módulos fotovoltaicos é vantajosa também do ponto de vista ambiental, no referente ao consumo de água, energia e materiais, além disso, as emissões dos gases do efeito estufa são reduzidas. O autor complementa afirmando que “O chamado Tempo de Retorno da Energia (do inglês *Energy Payback Time*), que é uma medida para expressar em quantos anos um módulo solar recupera a energia despendida e a poluição associada à sua produção por meio da geração de energia fotovoltaica, pode ser reduzido em até 4 anos”.

Alguns dos componentes dos módulos como a prata, o silício e o antimônio (presente no vidro) apresentam um grande potencial econômico ainda inexplorado. O estimado é que em entre 2030 e 2050 a prata, o cobre e o alumínio irão corresponder de US\$0,54/W a US\$1,70/W do custo total dos módulos de silício cristalino, se tornando os principais atrativos da reciclagem dos módulos (PRADO, 2018). Na tabela 7 é possível notar quais os materiais recuperados, seu valor financeiro, sua massa por potência e os tipos de módulos fotovoltaicos em que se encontram.

Tabela 7 - Elementos metálicos e semimetálicos que podem ser recuperados de módulos fotovoltaicos.

Materiais recuperados	Preço [US\$/kg]	Massa por potência [kg/MW] (c-Si)	Massa por potência [kg/MW] (a-Si)	Tipos de módulos
Alumínio (Al)	1,89	10700	100	c-Si
Cobre (Cu)	6,00	583	-	c-Si
Silício 9N (Si)	14,27	3069	18	c-Si / a-Si
Prata (Ag)	530	5,115	-	c-Si
Índio (In)	540	300	900	a-Si, CIS, CIGS
Gálio (Ga)	300	-	-	CIGS
Germânio (Ge)	1760	-	Somado ao In	a-Si

Fonte: Adaptado de Prado (2018).

3 METODOLOGIA

3.1 Avaliação do Ciclo de Vida

Através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é possível avaliar o impacto ambiental potencial de algum produto ou atividade durante todo o seu ciclo de vida, também é possível identificar quais as etapas desse produto/atividade apresentam uma contribuição mais significativa para o impacto ambiental. Além disso, a ACV é capaz de estimar alternativas ou melhorias para esses produtos, processos ou serviços (MOURAD *et al.*, 2007).

Em seu projeto de pesquisa Scolla (2020) acrescenta uma definição mais detalhada:

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica desenvolvida que analisa possíveis impactos ambientais causados por um produto ao longo de sua vida útil, ou seja, envolve a quantidade de material e energia demandada pelo produto e a emissão de poluentes e resíduos durante os estágios de uso. A abordagem sistêmica da ACV é conhecida como do ‘berço ao túmulo’, na qual são levantados os dados em todas as fases do ciclo de vida do produto. O ciclo de vida se refere a todas as etapas de produção e uso de produtos, relativas à extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso (SCOLLA, 2020 p.28).

Essa técnica tem como objetivo principal avaliar os diversos aspectos referentes ao desenvolvimento de um produto/serviço, bem como o seu potencial impacto durante seu ciclo de vida, através da avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais causados. Com a ACV é possível avaliar impactos ambientais em potencial com o auxílio de indicadores, que devem ser utilizados de acordo com a técnica que está sendo aplicada, do âmbito e dos objetivos pretendidos. A grande vantagem da avaliação do ciclo de vida é sua capacidade de ser alterada ao encontrar novos dados científicos ou tecnologias do estudo em questão são aperfeiçoadas (LARA, 2018).

Lara (2018) declara que a avaliação do ciclo de vida se inicia com a extração da matéria-prima e tem seu fim com ela chegando à sua origem (aterro). Já os impactos acumulados ao longo do ciclo de vida do material são estimados através dos processos intermédios da transformação, produção e sua utilização.

A figura 14 apresenta os principais estágios analisados durante a avaliação do ciclo de vida de forma sucinta.

Segundo a ISO 14040 (2001) a Avaliação do Ciclo de vida pode beneficiar nos seguintes aspectos: na identificação de oportunidades visando à melhoria dos aspectos ambientais nos diversos pontos do ciclo de vida do produto; na tomada de decisão da indústria, organizações governamentais e não governamentais; no referente ao planejamento

estratégico; definição de prioridades; na seleção de indicadores de desempenho ambiental; por fim, no marketing do referente produto/serviço.

Figura 14 - Principais etapas do ciclo de vida de um produto.



Fonte: Scolla (2020).

Além disso, a ISO 14040 (2001) também identifica as limitações das técnicas da ACV, são elas: a limitação dos próprios modelos que são usados na análise de inventário ou para avaliação dos impactos ambientais, devido às suas suposições e falta de disponibilidade para todos os impactos em potencial ou aplicações; a subjetividade da natureza das escolhas e suposições realizadas; incerteza nos resultados, devido à falta de dimensões espaciais e temporais dos dados do inventário; os resultados dos estudos com foco em questões globais ou regionais podem não ser adequados em aplicações locais; e a exatidão dos estudos pode ser limitada pela disponibilidade, qualidade dos dados ou acessibilidade.

A Avaliação do Ciclo de Vida solicita qualidade e disponibilidade de um grande volume de dados, algumas vezes, as empresas e os setores produtivos não têm interesse em fornecer essas informações de dados, devido ao sigilo de tais informações relacionadas aos seus insumos e tecnologias. Ou até mesmo, receio de possíveis irregularidades nos seus procedimentos, podendo causar punições dos órgãos ambientais (SCOLLA, 2020).

3.2 Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida

Hinz *et al.* (2006) identificaram quatro etapas para a realização da ACV, são elas: definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto e, por fim, interpretação dos dados e resultados. De acordo com Scolla (2020) a ACV apresenta a seguinte metodologia, estruturada em quatro etapas, da seguinte forma:

- Definição do âmbito e objetivo da análise a efetuar

São estabelecidas as fronteiras do estudo, tanto temporal como geográficas, os critérios de qualidade, as regras de corte, o objetivo dos resultados e as classes de impactos que serão avaliadas.

- Elaboração do inventário dos processos e seus respectivos fluxos e energia e materiais

Nessa etapa são coletados os dados de entrada e saída das diversas etapas do ciclo de vida do produto/serviço referentes aos fluxos de massa e energia.

- Avaliação dos impactos ambientais

Conversão dos fluxos da etapa anterior em impactos ambientais, “através da multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência que remetem a resultados em unidades comuns”.

- Interpretação dos resultados

Aqui é realizada a checagem da integridade, consistência e sensibilidade dos resultados, são estabelecidas as conclusões, limitações e recomendações do estudo, com base no objetivo estabelecido na primeira etapa.

Em sua dissertação de mestrado em ciências mecânica Oliveira (2017) apresenta essas etapas de forma sucinta:

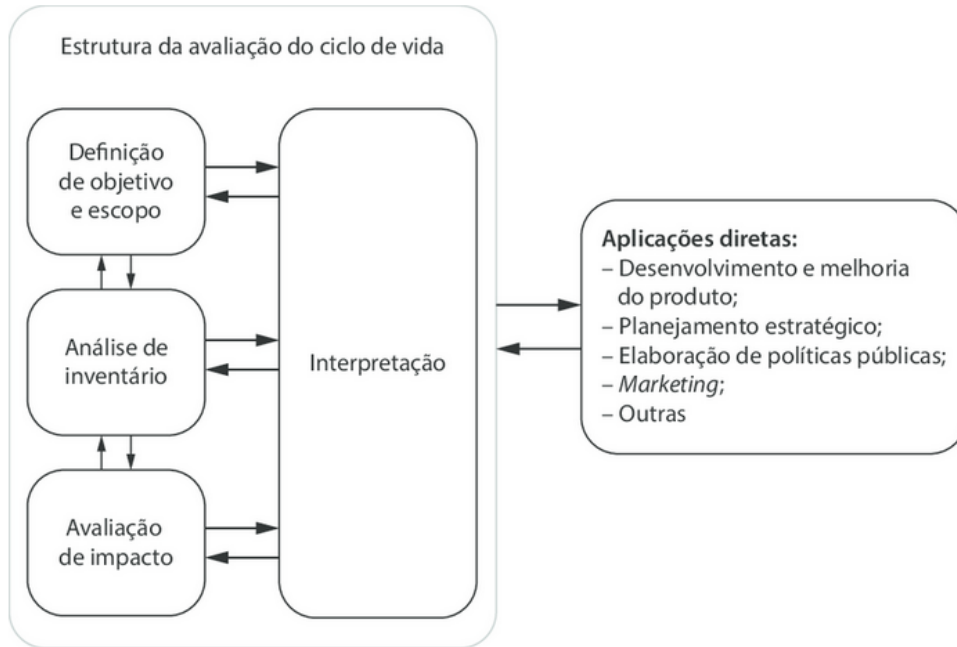
Na fase da definição do objetivo e escopo deve ser escolhido a fronteira do sistema, a unidade funcional, quais os requisitos de qualidade dos dados e qual o objetivo de estar fazendo essa análise. A análise de inventário é a fase onde os dados são coletados e inseridos nas entradas e saídas do sistema, dados qualitativos e quantitativos. Na fase de avaliação dos impactos é observado a significância dos impactos ambientais potenciais, ou seja, os que mais foram relevantes na análise. Ao final da coleta das três fases, é feita então uma interpretação dos resultados obtidos visando alcançar conclusões e recomendações (OLIVEIRA, 2017 p.18).

A autora ainda complementa ao afirmar que a etapa do inventário apresenta grande significância para a avaliação do impacto ambiental e na importância que essas análises podem vir a ter na seara ambiental. Quando se tem certa quantidade de material ou energia

deixando um processo, ela é considerada como saída, já na entrada ocorre o inverso, e o sistema de produto compreende o conjunto dessas entradas e saídas (OLIVEIRA, 2017).

Na figura 15 são apresentadas as fases da Avaliação do Ciclo de Vida.

Figura 15 - Fases do Ciclo de Vida.



Fonte: Adaptado de ISO 14040 (2001).

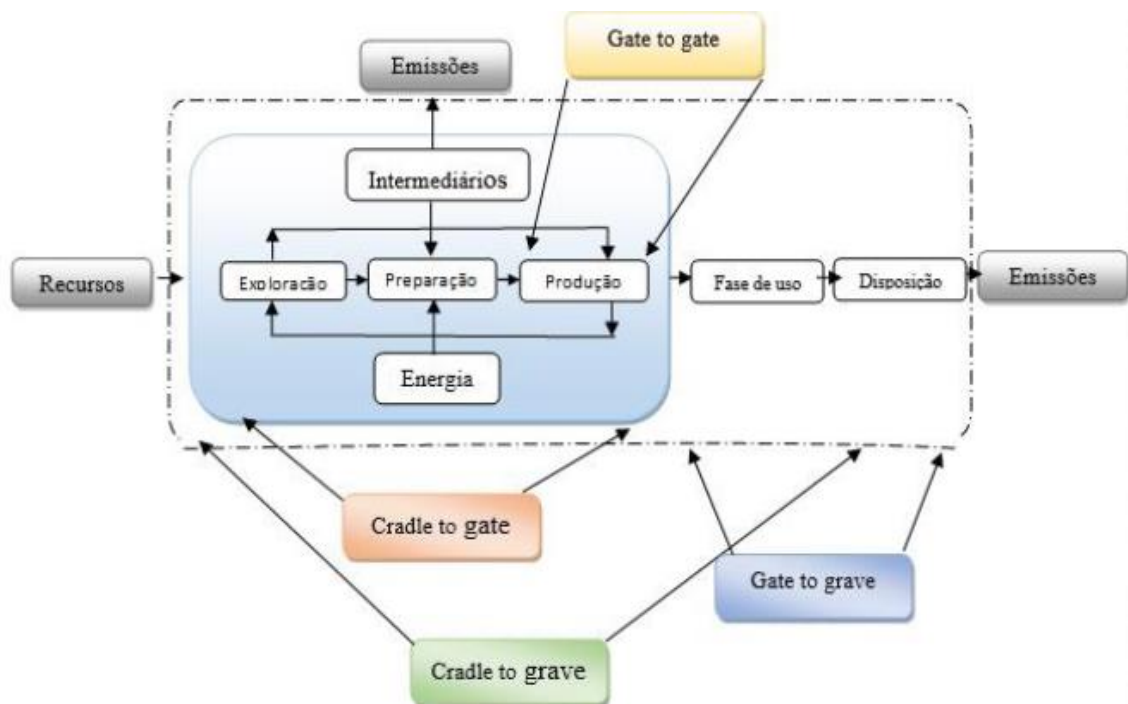
Durante a ACV é necessário ter como base uma unidade funcional, é a referência do inventário, seu objetivo é estimar o desempenho do produto/serviço através de uma função associada a ele, todas as entradas e saídas estarão associadas a ela. As fronteiras do sistema são definidas como os limites do estudo, desde o início da Avaliação do Ciclo de Vida até o fim de sua análise, são as limitações do estudo. Durante a primeira etapa da ACV é realizado o levantamento inicial da fronteira, mas somente depois de realizar o inventário é que o final da fronteira é definido, pois somente após realizar todo o levantamento se tem conhecimento suficiente de quais fronteiras poderão ser analisadas. Além disso, se for empregue uma fronteira arbitrária, sem a análise prévia, erros significativos poderão ser inseridos (OLIVEIRA, 2017).

Oliveira (2017) apresenta as quatro principais formas de se definir a fronteira, são elas: *Cradle to gate*, *Cradle to grave*, *Gate to gate* e *Gate to grave*. A primeira analisa desde o início do sistema, o chamado “berço” do sistema, por exemplo, do início da extração ao produto final na fábrica. A segunda analisa desde o início do sistema até disposição final do produto ou sua reciclagem, passando pela produção, transporte e uso.

Já a *Gate to gate* examina as fases de produção durante a fabricação do produto, é usado para avaliar processos únicos que serão inseridos na fase produtiva. E por fim, a forma *Gate to grave* avalia o produto desde o fim de sua produção até o fim de sua vida útil, é usado na determinação dos impactos ambientais que ocorrem durante a vida útil do produto (OLIVEIRA, 2017).

A figura 16 apresenta as principais formas de definição de fronteiras de maneira sucinta e lúdica.

Figura 16 - Quatro principais formas de definir a fronteira de um sistema.



Fonte: Oliveira (2017).

Para Scolla (2020) o inventário do ciclo de vida (ICV) tem como objetivo a identificação e quantificação das entradas e saídas tanto de materiais como da energia requerida em cada processo, além das emissões e resíduos gerados e materiais e energia recuperados, tudo isso considerando os limites do sistema. A autora ainda destaca que as emissões do sistema, durante a etapa de avaliação de impacto, “são quantificadas em termos de seus potenciais impactos ambientais [...] o impacto ambiental de cada emissão do inventário para o meio ambiente é modelado quantitativamente de acordo com o chamado mecanismo ambiental, utilizando um modelo de caracterização”.

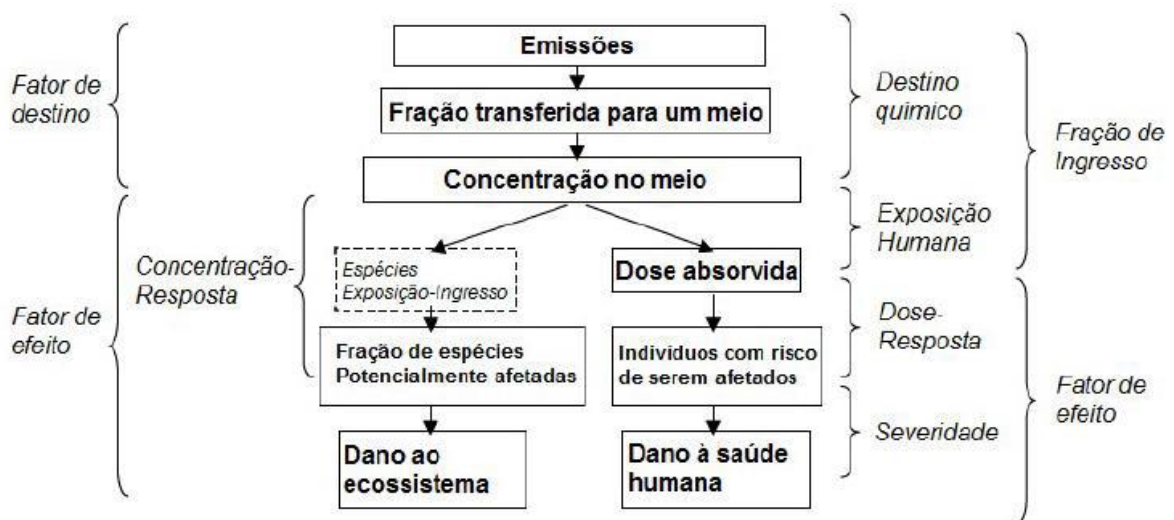
Esse modelo de caracterização calcula os fatores de caracterização para as emissões, suas determinações são baseadas em técnicas científicas, como resultado o valor do potencial

impacto de cada uma das emissões é estabelecido em termos de uma única unidade, os resultados são considerados os indicadores de categoria. Em seu trabalho de conclusão de curso Scolla (2020) apresenta o mecanismo dos métodos de Avaliação de Impacto de forma resumida:

[...] uma emissão (massa de certa substância) é relacionada a uma mudança temporária na concentração desta substância em um meio natural (água, terra ou ar). Em seguida esta concentração temporária é relacionada a um efeito naquele meio, como por exemplo um aumento na acidificação do solo ou um aumento na temperatura ambiente (função dose-resposta). A seguir estes efeitos são relacionados à consequência à vida humana, ao ecossistema ou ao uso de recursos. (SCOLLA, 2020, p.34 e 35).

A figura 17 apresenta o processo das emissões até seu impacto de forma resumida.

Figura 17 - Esquema geral do caminho percorrido por uma emissão até o impacto.



Fonte: Scolla (2020).

Toda fonte energética apresenta algum nível de impacto ambiental. A energia solar fotovoltaica é contaminante, porém em níveis infinitamente inferiores a outras fontes energéticas como o carvão. As emissões de gases poluentes oriundos da energia solar estão mais relacionadas ao transporte de equipamentos do que a fase de manufatura ou operação, além disso, seus impactos ambientais durante sua vida útil são bem menores (BARROS, 2017).

De acordo com Lara (2018), a Avaliação do Ciclo de Vida apresenta medidas mitigadoras preventivas ou corretivas focando numa produção mais limpa. Existem diversas aplicações para a ACV, porém elas podem ser divididas em duas direções principais:

identificação de oportunidade de melhoria no desempenho ambiental; e comparação ambiental entre produtos/serviços que cumprem a mesma função.

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil

No Brasil há algumas limitações referentes aos estudos de ACV, Scolla (2020) destaca a ausência de um banco de dados nacional para retratar a realidade do país e assim possa melhorar a aplicação da avaliação, expandir o uso dessa ferramenta nacionalmente e incentivar a criação de softwares nacionais dedicados a ACV. Além disso, também não se tem métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) que representa a realidade do Brasil, métodos focados para as características ambientais nacionais, nas circunstâncias atuais são usados métodos que consideram impactos ambientais globais ou relativos ao local específico da sua região de desenvolvimento.

A AICV apresenta outro desafio: avaliação do impacto potencial associado ao inventário. Ao utilizar um procedimento cabível a todos os fluxos de entrada e saída de tal maneira que reproduza uma consistência do fator de caracterização, resultando em dados que sejam comparáveis entre as diferentes categorias de impacto, diferentemente do procedimento atual onde são gerados diferentes fatores de caracterização (BARROS, 2017).

Ademais, em seu estudo Scolla (2020) afirma que não existe um consenso entre os modelos de caracterização de representatividade global no quesito dos impactos regionais, a autora aponta que “o desenvolvimento de modelos para as categorias de impacto locais vem com uma forte associação regional que às vezes torna a decisão difícil quando as emissões de um sistema de produto ocorrem em continentes diferentes”.

A primeira atividade formal que envolve a Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil, aconteceu em 1994, segundo Scolla (2020), com a criação do Grupo de Apoio à Normalização (GAN), que apresentava como objetivo proporcionar a participação brasileira nas normas ambientais. Já o primeiro estudo nacional foi denominado “Análise do Ciclo de Vida de embalagens para o mercado brasileiro”, e tinha como desenvolvedores o Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), analisou os diferentes materiais usados nas embalagens alimentícias, atentando às suas condições e nível de tecnologia.

Em 1998 foi fundado o Grupo de Prevenção da Poluição (GP2), que além de avaliar o ciclo de vida de bens e serviços, apresenta como objetivo principal cooperar para que o uso

da ACV seja consolidado no país, com a elaboração de uma metodologia de execução adequada às condições do Brasil e um banco de dados, além disso, possibilitar que estudos de Avaliação do Ciclo de Vida sejam desenvolvidos no país com as condições necessárias (SCOLLA, 2020).

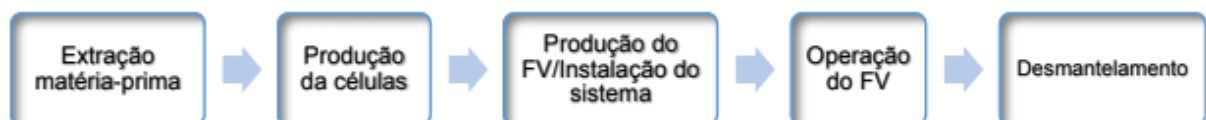
Três anos depois, a ABNT apresenta a primeira norma da ISO da série 14040, despertando o interesse das empresas e instituições pela ACV, assim muitas iniciaram o uso da ACV com o objetivo de avaliar seus próprios processos produtivos do ponto de vista ambiental. A Associação Brasileira do Ciclo de Vida, fundada em 2007, tinha como missão, segundo Scolla (2020), “reunir interessados na ACV (órgão, entidades e empresas), a fim de discutir e coordenar atividade de construção do banco de dados brasileiros, de formação de recursos humanos e da manutenção dos vínculos internacionais envolvidos no tema”.

De acordo com Barros (2017), a ABNT publicou em 2004 duas normas de gestão ambiental, relacionadas à ACV, são elas: NBR ISO 14041, intitulada “Definição de objetivo e escopo e análise de inventário” e a NBR ISO 14042, intitulada “Avaliação do impacto do ciclo de vida”. No ano seguinte, foi lançada a norma NBR ISO 14043, intitulada “Interpretação do ciclo de vida”. Nos últimos anos diversos estudos relativos à Avaliação do Ciclo de Vida têm sido realizados no país, principalmente no meio acadêmico, manifestando a crescente preocupação nacional com os impactos ambientais causados por produtos e serviços.

3.4 Ciclo de Vida de um sistema fotovoltaico de primeira geração

Em seu estudo, Scolla (2020), apresenta as várias etapas do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos, que vão desde a extração da matéria-prima até sua decomposição nos aterros ou para a reciclagem, como é apresentado na figura 18.

Figura 18 - Ciclo de Vida de um Sistema Fotovoltaico.



Fonte: Scolla (2020).

O princípio do ciclo de vida se dá através da extração da sílica, matéria-prima principal do módulo analisado. Posteriormente se encontra a etapa de produção da célula, é

aqui onde se tem o processo mais energético do ciclo de vida. A principal fonte da sílica, areia, é disposta num forno de arco elétrico para se transformar em silício metalúrgico (mg-Si) com grau de pureza de 98%, porém esse valor ainda não é suficiente. Dessa forma, ocorre a purificação do silício metalúrgico (mg-Si). Posteriormente, durante a montagem do módulo fotovoltaico, as células são conectadas umas às outras em cadeia, através de contatos de prata, alumínio ou cobre na parte frontal e posterior, devido à evaporação a vácuo (SCOLLA, 2020).

Em seguida são adicionadas duas camadas de espuma vinílica acetinada (EVA), uma acima e outra abaixo das células, para proteção a elementos físicos durante a operação, uma camada de vidro com baixo teor de ferro é posta na face frontal e outra na face posterior. Por fim o módulo é moldado sob pressão e calor, e suas conexões são isoladas e molduras de alumínio são instaladas com o objetivo de facilitar a instalação no futuro (SCOLLA, 2020).

Na fase de operação, deve-se realizar a manutenção do sistema fotovoltaico, com revisão do sistema elétrico e limpeza dos painéis, nessa etapa não há emissões de poluentes. Por fim, tem-se o desmantelamento ao final do ciclo de vida, quando os módulos são recolhidos e levados para entidades responsáveis por seus resíduos, aqui alguns componentes são enviados para a reciclagem e outras para aterros (aqueles que não podem ser reciclados). Durante a ACV é analisado toda a quantidade de material e energia exigida pelo produto bem como a emissão de poluentes em cada estágio de uso (SCOLLA, 2020).

Segundo Lara (2018), para ser avaliado os impactos do uso da energia solar fotovoltaica, deve-se aplicar a técnica de ACV, que analisa os impactos sobre o meio ambiente causados pelo produto durante todas as etapas do seu ciclo de vida. Mesmo a energia solar fotovoltaica não emitindo gases do efeito estufa durante a sua fase de operação, ainda é necessário ser realizada uma verificação de todos os impactos envolvidos na produção e descarte de seus equipamentos.

Em seu estudo, Scolla (2020), definiu o ciclo de vida do sistema fotovoltaico com os seguintes processos: manufatura, operacional e desconexão. A manufatura é caracterizada pela etapa de extração da matéria-prima até a construção dos projetos, passando pelo tratamento dos materiais, sua produção e instalação. A etapa operacional é simplesmente a operação e manutenção dos equipamentos de geração. A última etapa é a responsável pelo descomissionamento e descarte dos equipamentos. Como é apresentada na figura 19 a seguir.

A ACV de um sistema fotovoltaico varia de acordo com a região e tecnologia usada (LARA, 2018). Nesse trabalho serão analisados os impactos causados pelo principal equipamento do sistema fotovoltaico: o módulo fotovoltaico.

Figura 19 – Estágio do Ciclo de Vida do sistema fotovoltaico.



Fonte: Scolla (2020).

Scolla (2020) apresenta que o estágio de manufatura é aquele com os maiores impactos negativos do sistema FV, e são os módulos aqueles que consomem mais energia durante a produção, devido as suas diversas etapas, recursos e elementos químicos distintos, eles são responsáveis por cerca de 85% de toda a energia usada na fabricação do sistema FV, seguido pelos inversores com 7%, a fiação com aproximadamente 4% e os 4% restantes ficam com o transporte. Porém, no Brasil essas proporções podem alterar um pouco, principalmente o referente ao transporte.

A emissão de gás carbônico realizado pela energia solar fotovoltaica é entre 92 e 96% menor do que a realizada por combustíveis fósseis durante sua vida útil, valor que repara os impactos ambientais causados por ela em comparação a outras fontes energéticas. O

estimado para que o módulo gere a quantidade de energia utilizada para sua produção é de aproximadamente 1,5 a 2,5 anos. É de grande conhecimento que a maior parte dos módulos comercializados mundialmente hoje em dia (aproximadamente 80%) é produzida a partir do silício (Si), ou seja, são os módulos de primeira geração (SCOLLA, 2020).

De forma mais sucinta, Scolla (2020), apresenta os processos da fase de fabricação das células solares em relação aos seus impactos ambientais. Durante a extração do silício se tem impactos à fauna e flora locais, destruição da paisagem visual e poluição da água durante a mineração. Já no tratamento do silício é destacada a emissão de pó sílica na fundição, emissão de alguns compostos como: hexafluoreto de enxofre, tetracloreto de silício, ácido clorídrico, nítrico, sulfúrico, fluorídrico, acetona, entre outros, sendo alguns altamente tóxicos (sendo que os dois primeiros são emitidos na fase de purificação).

Existem regras em cada país sobre a fabricação das células fotovoltaicas de silício, de acordo com Dias (2015), visando à segurança dos trabalhadores e o descarte correto dos resíduos gerados. Durante a montagem dos módulos são usados produtos considerados nocivos ao ambiente como o chumbo, o alumínio e a prata.

Segundo Scolla (2020) as etapas de transformação do silício e a montagem dos módulos são consideradas as de mais elevado impacto ambiental, emitindo gases do efeito estufa e poluição em geral, graças ao elevado consumo de eletricidade e diversos tipos de matéria-prima. Destacando que as células de silício monocristalino são as que apresentam os maiores impactos durante seu ciclo de vida.

Durante a etapa de construção das usinas deve-se destacar que seus impactos só estão relacionados para projetos de grande porte, geração centralizada, onde são usadas milhões de placas e vários hectares de terra. Na geração distribuída, nas residências e pequenos comércios, os impactos dessa etapa são considerados nulos, pois geralmente as placas são instaladas nos telhados, não impactando espaços de terra. Agora será avaliada a construção de usinas de geração centralizada em três âmbitos: meio biótico, físico e socioeconômico (LARA, 2018).

Em relação ao meio biótico, a instalação das usinas pode causar alterações da fauna, o processo de reprodução animal, perda de alimentação e do habitat natural, além da mudança nos padrões de movimentação, já em relação à flora existe o risco de desgaste do solo devido à terraplanagem, a remoção da cobertura vegetal e até mesmo alteração dos níveis de lençol freático (PORTAL SOLAR, 2021). Scolla (2020) destaca que a retirada da cobertura vegetal pode “intensificar processos erosivos e de assoreamento, causar alterações no fluxo hidrológico superficial e escassez de alimento a fauna local, causando sua migração. Essa

remoção da vegetação pode ainda causar a eliminação da microfauna local”. Além disso, um dos impactos dessa etapa são os acidentes com animais, ao invadirem o local do empreendimento devido à destruição de seus abrigos, podendo ser atropelados nas pistas locais.

Nos impactos ao meio físico pode-se citar: alterações/degradações da paisagem (dependendo do porte e local do empreendimento), geração de resíduos sólidos e contaminação do solo através das atividades do canteiro de obras, alterações do fluxo hidrológico superficial, graças ao desgaste do solo, podendo causar problemas de erosão do solo e alterações na qualidade do ar pela emissão de gases e poeira, graças a uma maior intensidade de circulação de veículos e máquinas (SCOLLA, 2020).

Por fim os impactos causados ao meio socioeconômico destacam-se o aumento do ruído e da vibração causados pelos veículos pesados utilizados para a construção das usinas, diversos transtornos que podem causar às comunidades próximas ao empreendimento como: poeira, emissão de gases, desgaste das vias de trânsito da região e aumento no número de acidentes de trânsito (SCOLLA, 2020).

Na etapa operacional é a que se encontram os menores impactos ambientais, sendo até mesmo considerados insignificantes, já que não há emissão de gases poluentes causadores do efeito estufa, a energia consumida nessa etapa é mínima e a água usada para a limpeza dos painéis não é obrigatória, pois existem sistemas automáticos de limpeza dos módulos usados em grandes empreendimentos, que não utilizam água durante sua operação. Além disso, é a etapa de maior duração de todo o ciclo de vida dos módulos FV (SCOLLA, 2020).

Ainda não se tem consciência dos impactos, em grande escala, causados pela etapa de desconexão, graças ao elevado tempo de vida útil dos painéis. Porém com base no princípio dos três Rs (reduzi, reusar e reciclar) podem-se observar diversas soluções e alternativas para esses equipamentos. Já existem pesquisas focadas numa redução significativa da quantidade de silício que é usada nos painéis solares, e a tendência é que essa redução aconteça também para outros materiais raros e nocivos que estão presentes nos módulos, o que aumentará sua capacidade em ser reciclado (SCOLLA, 2020).

Reutilizar módulos de meia vida ou danificados é uma alternativa para essa tecnologia, de acordo com Scolla (2020), além do reaproveitamento dos materiais que o compõem. A reciclagem desses materiais já é uma realidade na Europa. Existem placas compostas por 90% de materiais não nocivos (vidro, polímero e alumínio), podendo ser facilmente reciclados, apresentando uma elevada eficácia de reciclagem e com mínimos impactos ambientais.

3.5 Fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos

Em seu estudo Dias (2015), afirma que ao fim da sua vida útil, quando os módulos são descartados eles são considerados REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos Eletrônicos), eles têm um elevado potencial para contaminar o solo, graças à sua composição de materiais tóxicos que são liberados ao ambiente. Dessa forma, esses materiais devem ser separados dos resíduos sólidos e serem descartados de forma correta, caso contrário podem causar lixiviação de metais tóxicos.

Os módulos fotovoltaicos podem liberar cádmio e chumbo, considerados danosos ao meio ambiente, quando descartados de forma incorreta torna impossível a reciclagem dos materiais como vidro, alumínio e materiais considerados raros como a prata, o índio, o gálio e o germânio (DIAS, 2015).

Uma gestão adequada para o fim da vida útil dos painéis é importante para evitar impactos ambientais em relação à disponibilidade da matéria-prima e da geração de resíduos. Nos processos industriais, como é o caso dos módulos FV, os resíduos se acumulam, pois não há uma decomposição de forma natural, destacando a importância de procedimentos adequados ao final da vida útil dos painéis como a reciclagem e o descarte correto. Aumento de resíduos causa o crescimento da poluição sobre o meio ambiente, assim como a redução dos recursos naturais, dessa forma fica claro a necessidade de uma gestão e tratamento para os painéis após seu ciclo de vida (DIAS, 2015).

De acordo com Dias (2015), os módulos FV apresentam uma vida útil de 25 a 30 anos, entre os principais fatores responsáveis por determinar o fim de sua vida útil pode-se citar: decomposição do encapsulante (EVA) devido à sua longa exposição ao sol, possíveis defeitos nas células fotovoltaicas e danos nos materiais internos por conta de efeitos externos, por exemplo, na camada de vidro. Podem acontecer também problemas antes mesmo que os módulos atinjam seu fim de vida, por exemplo, falhas durante o transporte e a instalação dos materiais, avarias iniciais logo após o startup de operação e danos que ocorram ao longo da operação que podem ser provocadas por severas condições ambientais e outros fatores inesperados.

Segundo Lara (2018), o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos apresenta diversos pontos a melhorar, resíduos são gerados em várias etapas por todo o ciclo de vida. Para um ciclo de vida ideal há a maximização do aproveitamento da matéria-prima e tanto o uso da matéria-prima como a geração de resíduos são minimizadas. Na figura 20 são apresentados os

possíveis fluxos (linhas pontilhadas) para a redução dos impactos ambientais na gestão de fim de vida.

Figura 20 – Fluxo da gestão do fim de vida.



Fonte: Scolla (2020).

Os módulos fotovoltaicos apresentam metais em sua composição, alguns deles são considerados perigosos como cádmio, chumbo e selênio, por isso a importância do descarte correto. Quando seus resíduos são rejeitados de forma inadequada pode causar diversos impactos negativos tanto ao meio ambiente como ao ser humano, como: perdas de recursos já processados como vidro e alumínio, lixiviação do cádmio e chumbo, escassez de metais raros como a prata, entre outros. Geralmente um módulo FV típico de c-Si, com cerca de 22 kg, tem em média 12,67g de chumbo, quantidade superior ao limite dos níveis para a disposição em aterros comuns (SCOLLA, 2020).

O chumbo apresenta um alto potencial de acumulação tanto no corpo humano como no meio ambiente, de acordo com Scolla (2020). Esse metal está relacionado com doenças no sistema nervoso, cardiovascular e osteoporose, entre outras doenças, de acordo com a quantidade de exposição do indivíduo. Já no meio ambiente o chumbo pode causar impactos na biodiversidade e afetar o crescimento e reprodução de plantas e animais, além de afetar o sistema neurológico dos animais vertebrados.

Considerando um módulo típico de 22 kg, a maior parte de sua composição são o vidro e o alumínio com 75% e 10%, representando 16,6 kg e 2,2 kg, respectivamente. Esses componentes apresentam um grande potencial de serem recuperados após o fim da vida útil

dos módulos FV, sua disposição incorreta em aterros pode causar um grande impacto negativo ao meio ambiente (SCOLLA, 2020).

O Sol funciona como um imenso reator à fusão, ele irradia na Terra um elevado potencial energético, considerado único frente a outros sistemas energéticos, segundo Scolla (2020). A autora afirma que o Sol é “a fonte básica e indispensável para praticamente todas as fontes energéticas utilizadas pelo homem”. A energia solar é uma fonte renovável, mas isso não significa que não causa impactos ambientais, em contrapartida seus impactos são considerados localizados e podem ser rapidamente tratados após a ocorrência.

Segundo Lara (2018), alguns benefícios do uso correto da energia fotovoltaica e da reciclagem de seus módulos são: a manutenção necessária é mínima, redução da emissão dos gases do efeito estufa, declínio do custo da implantação da energia, redução dos gases como óxido de nitrogênio, óxido de enxofre e monóxido de carbono, economicamente viável, entre outros.

4 PROPOSTAS E DISCUSSÃO

4.1 Tecnologias de reciclagem para sistemas fotovoltaicos

Quando se trata do destino final dos REEE, há três opções principais: reuso, remanufatura e reciclagem. De acordo com Bettanin (2017) o reuso acontece quando o resíduo não desempenha as condições necessárias de uso para o seu consumidor original, mas ainda pode apresentar valor para outros consumidores, podendo ser destinado às escolas e instituições de caridade sem a realização de nenhuma modificação no resíduo original, essa é uma opção prioritária no destino dos REEE.

Na remanufatura, são usadas as peças dos resíduos para a produção de equipamentos novos e seminovos, nesse processo os resíduos são desmontados, limpos, reparados e por fim, remontados no novo produto final. Por fim a reciclagem, que acontece quando as outras duas opções não podem ser realizadas, aqui os resíduos são reprocessados, onde são desmontados e/ou destruídos do equipamento original com o objetivo de se obter novamente os materiais de valor contidos nos resíduos (BETTANIN, 2017).

De acordo com Ghizoni (2016), atualmente existem diversas alternativas acerca do tratamento dos resíduos FV, nesse trabalho será abordado somente a categoria referente a reciclagem, sendo esta a opção que envolve a separação dos painéis fotovoltaicos em partes homogêneas e reutilizáveis.

A busca por novas tecnologias de reciclagem e processos como a logística reversa vem se tornando de grande interesse dos fabricantes, de acordo com Scolla (2020). A tabela 8 apresenta um resumo com os principais métodos de reciclagem já encontrados na literatura.

Segundo Ghizoni (2016), a reciclagem é considerada a principal escolha acerca do assunto tratado, pois está atrelada a redução da matéria-prima que será empregada no futuro, reduzindo a emissão dos gases do efeito estufa no caso da fabricação dos módulos FV c-Si. A autora ainda apresenta as diversas etapas do processo de reciclagem, que está sendo apresentado na figura 21.

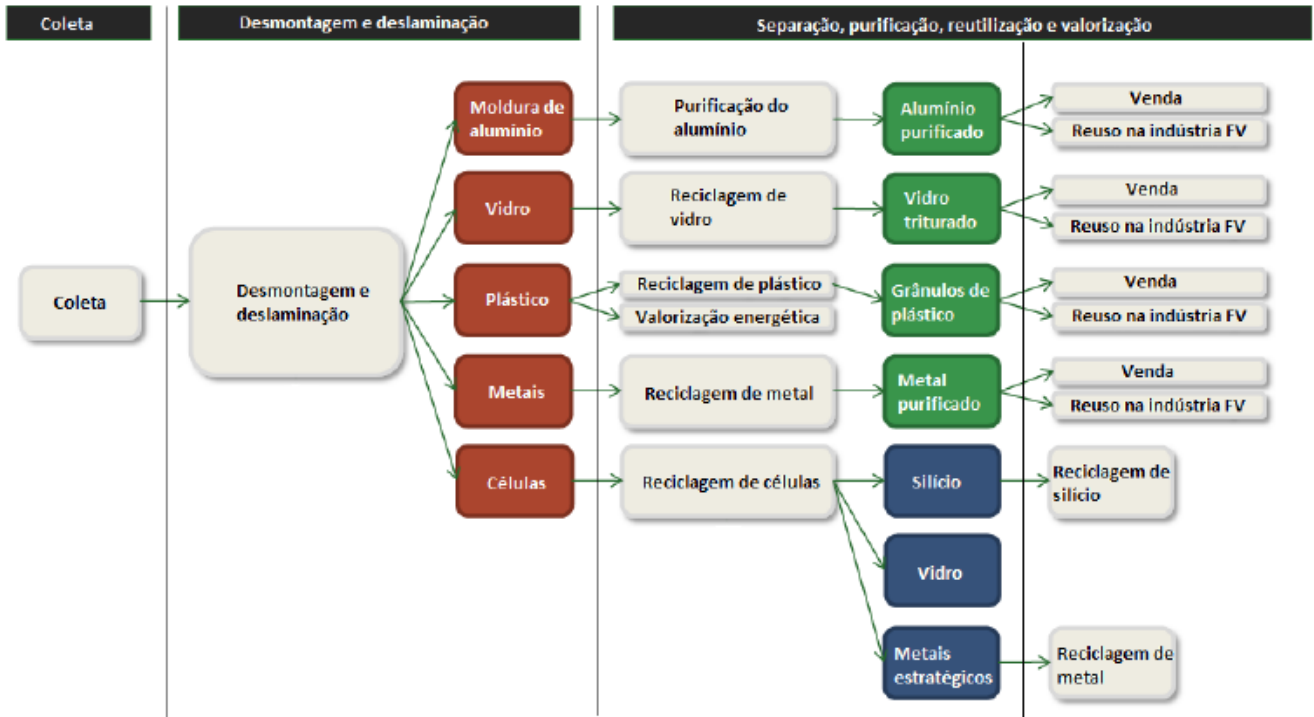
É possível notar que após o sistema de reciclagem são obtidas substâncias que podem ser usadas novamente no ciclo produtivo, podendo ser recicladas novamente após seu ciclo de vida (GHIZONI, 2016). A tabela 9 apresenta o destino que cada componente pode apresentar ao final do seu processo de reciclagem.

Tabela 8 – Tecnologias de reciclagem para módulos c-Si encontradas na literatura.

Tecnologia / Processo	Vantagens	Desvantagens
Dissolução em solvente orgânico	Fácil remoção do EVA Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Impacto devido às emissões e resíduos do meio Custos dos equipamentos
Calor / Eletrotérmico	Fácil remoção do vidro	Processo lento
Separação mecânica	Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV
Pirólise	Recuperação de materiais (80% do sanduiche e de 100% do vidro) Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células
Dissolução em solvente (Ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduiche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV
Mecânico (seco e úmido)	Minimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas

Fonte: Adaptado de Scolla (2020).

Figura 21 – Etapas de reciclagem dos componentes dos módulos FV.



Fonte: Ghizoni (2016).

Tabela 9 – Destino dos componentes.

Componente	Reciclagem e Valorização
Vidro	Indústria de vidro / Indústria FV Indústria de lã de vidro Construção
EVA	Reutilização na indústria química Recuperação de energia da incineração Wafer com eficiência suficiente para produção de células FV
Semicondutor (1º Geração)	Reutilização na indústria FV como semicondutor Utilização como agregados para forno de função metalúrgica
Materiais estratégicos	Reutilização com seu nível de pureza original
Alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original

Fonte: Adaptado de Ghizoni (2016).

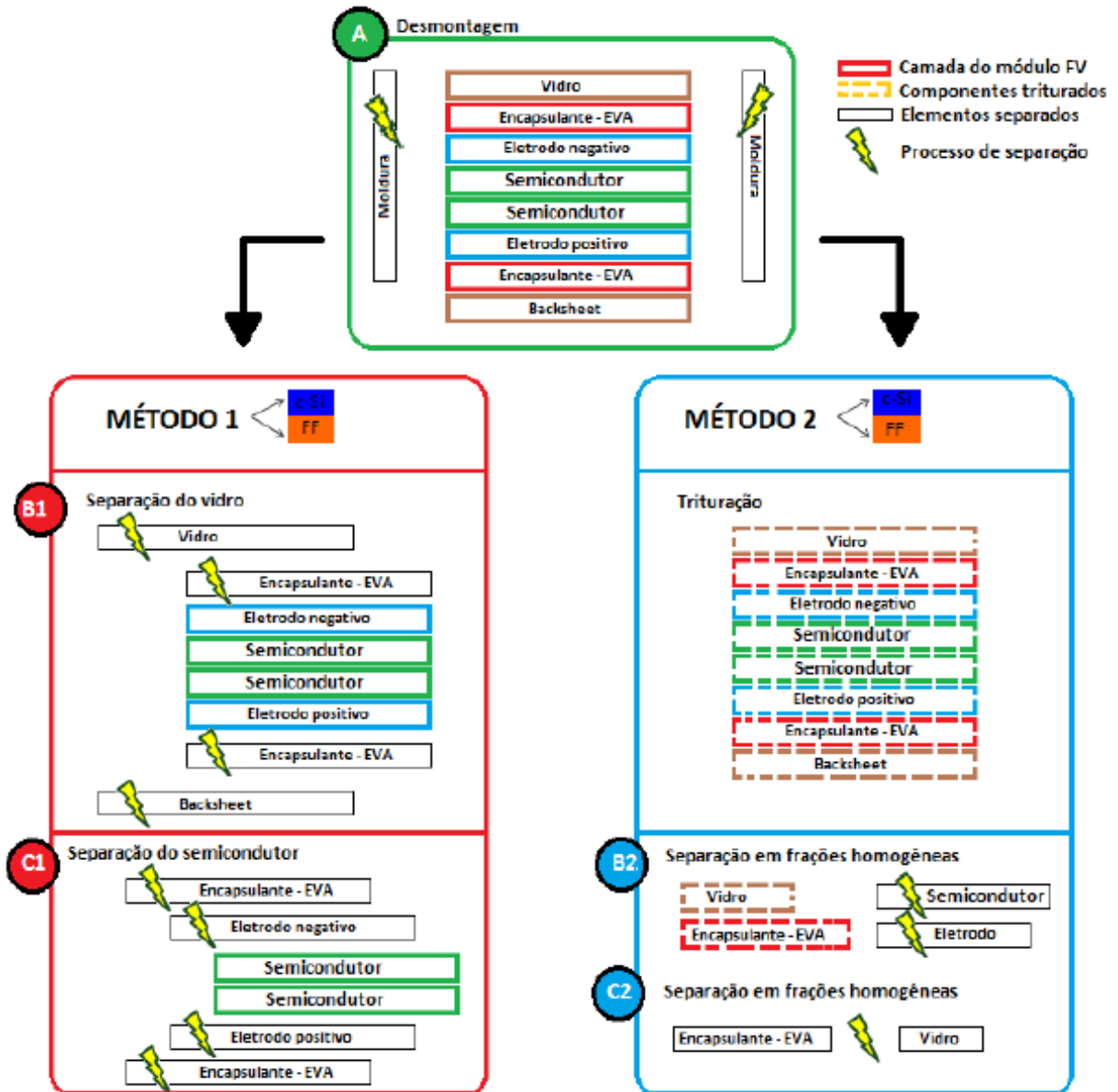
Nesse trabalho serão abordados somente os processos de reciclagem relacionados aos módulos de primeira geração.

Para a realidade brasileira, Ghizoni (2016) destaca dois métodos principais que podem ser implementados no país, são eles: o método caracterizado pela separação do vidro do restante do módulo FV, através da degradação das propriedades da lâmina do material

encapsulante (EVA), para melhor entendimento esse será chamado de Método 1, e o segundo método (a partir de agora chamado de Método 2) é baseado na desmontagem da moldura e trituração do módulo com o objetivo de separar as substâncias em fluxos homogêneos. Essa desmontagem dos módulos é realizada de forma mecânica, separando as molduras de alumínio do restante do módulo.

A figura 22 apresenta de forma sucinta as etapas de reciclagem dos módulos FV através dos Métodos 1 e 2.

Figura 22 – Métodos 1 e 2 da reciclagem de módulos fotovoltaicos.



Fonte: Ghizoni (2016).

No Método 1 primeiramente é realizado um processo de pirólise para a separação do vidro, do material encapsulante (EVA) e também do *backsheet* (B1). Posteriormente são

realizados processos químicos para a separação do material semicondutor dos eletrodos positivos e negativos presentes no módulo (C1) (GHIZONI, 2016).

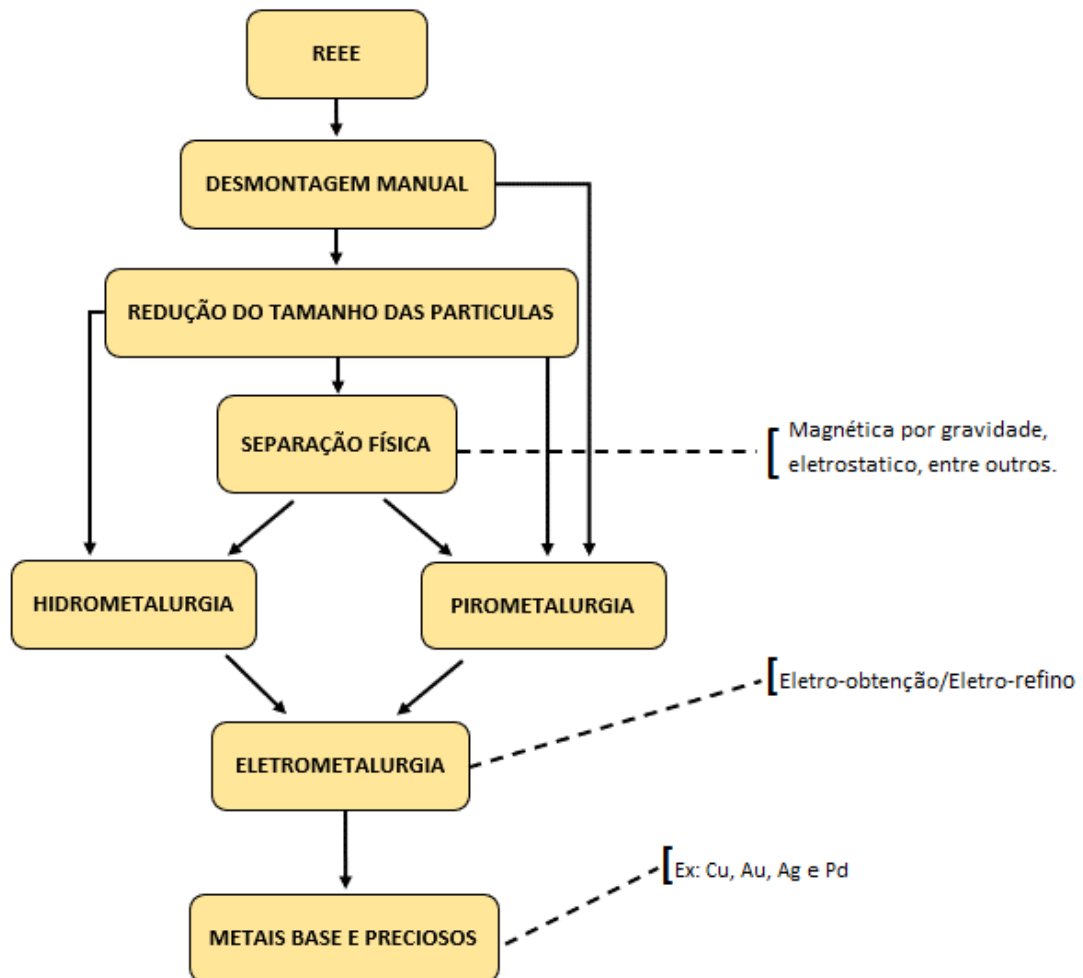
Já no Método 2, são usadas formas para triturar os componentes dos módulos, após essa etapa parte do vidro triturado pode ser misturado com vidros já reciclados e serem usados como isolantes térmicos em indústrias de espuma, por exemplo. Quanto às frações do EVA, elas podem ser reutilizadas para a própria geração de energia, sob forma de calor. Posteriormente através de processos mecânicos é possível separar os materiais semicondutores dos eletrodos, onde o vidro e o material encapsulante ainda triturados, essa etapa é a separação em frações homogêneas (B2). Por fim, a segunda etapa da separação em frações homogêneas (C2) são separados o material encapsulante do vidro, para os módulos de primeira geração não se tem informações referentes à forma de processo dessa etapa. Considerando os principais componentes dos módulos FV c-Si, pode-se obter um valor de recuperação superior a 85% (GHIZONI, 2016).

No geral os processos de reciclagem de equipamentos eletrônicos são formados por uma etapa de desmontagem e processos mecanizados para concentrar os materiais desejados, posteriormente são realizadas técnicas para remover as impurezas como a pirometalurgia e a hidrometalurgia (CRUZ *et al.*, 2020). Como apresentado na figura 23 a seguir.

Segundo Bettanin (2017) os processos mecânicos são considerados etapas de pré-tratamento dos resíduos, pois faz uso de métodos que facilitam a recuperação de materiais a partir de processos posteriores. Geralmente a desmontagem manual é considerada cara, já que a quantidade de metais preciosos presentes nos resíduos é baixa em porcentagem, dessa forma, são usados processos mecânicos para assim concentrar diferentes materiais e aumentar a área superficial dos resíduos, permitindo um melhor contato dos metais preciosos com os solventes durante os outros processos posteriores. Como exemplos de processos mecânicos pode-se citar a triagem, separação magnética, por gravidade, granulométrica, eletroestática, moagem, entre outros.

Para Bettanin (2017), os processos pirometalúrgicos são geralmente usados para a recuperação de metais não ferrosos e preciosos, as técnicas mais utilizadas são a incineração e a fundição em forno de arco de plasma ou alto forno. No geral esse processo compreende a fundição de resíduos pré-tratados a altas temperaturas, onde é formado um subproduto que contém óxidos de Fe, Pb e Zn, que serão tratados posteriormente, e barras de cobre, que adiante irão para um processo de eletrólise com o objetivo de se obter cobre de elevada pureza. O alto custo energético e financeiro, e o tratamento dos gases liberados por conta da formação de dioxinas, metais voláteis e poeira, são as principais desvantagens desse processo.

Figura 23 – Fluxograma de processos típicos para reciclagem de REEE.



Fonte: Adaptado de Cruz *et al.* (2020).

Outro processo utilizado para a reciclagem de REEE são os processos hidrometalúrgicos, eles são divididos em três etapas: lixiviação do resíduo em soluções ácidas ou básicas; separação ou concentração do material desejado através da precipitação de impurezas, extração por solvente, adsorção ou troca de íons; e por fim, refinamento do material por métodos eletroquímicos, redução química ou cristalização. Porém antes do processo hidrometalúrgico é necessário um pré-tratamento do material através de processos mecânicos, assim o metal desejado ficará exposto ao reagente lixivante para facilitar sua extração (BETTANIN, 2017).

Entre as vantagens do processo hidrometalúrgico estão: a exatidão da extração, custo reduzido, fácil controle, menor poluição ao meio ambiente comparado ao processo pirometalúrgico e reciclagem dos reagentes usados durante o processo. Já nas desvantagens pode-se citar: complexidade dos resíduos e a necessidade de grande quantidade de reagentes (BETTANIN, 2017).

Segundo Bettanin (2017) a lixiviação, uma das etapas do processo hidrometalúrgico, é definida como um processo onde um sólido é removido na forma solúvel devido a um solvente. A lixiviação que usa sais de cianeto é a mais usada para a extração de metais preciosos a partir de seus minérios, o uso de tal reagente permite um processo mais simples, rápido e de alta eficiência na concentração de metais, porém o uso de sais de cianeto apresenta uma alta toxicidade, então eles podem ser substituídos por tiosulfato, tiocianato, tiouréia, halogênios, entre outros.

Scolla (2020) destaca a existência de diversas técnicas tanto de pré-tratamento como de reciclagem para todos os tipos de tecnologias usadas nos módulos FV, a nível mundial. Delas podem-se destacar duas, que já foram testadas e estão em prática em nível operacional, são elas: o processo de reciclagem dos painéis de silício cristalino realizado pela *Deutsche Solar AG* e o processo de reciclagem para painéis de filme fino de telureto de cádmio realizado pela *First Solar*.

O primeiro processo, da *Deutsche Solar AG*, se inicia com a retirada dos componentes de plástico presentes no módulo FV, através de um processo térmico, posteriormente são separados de forma manual as células fotovoltaicas, os metais e o vidro. A escala piloto desse processo operou em 2003, porém ela deve de ser desligada devido à falta de recursos, já que o volume de resíduos FV descartados na época era baixo (SCOLLA, 2020).

Prado (2018) apresenta a técnica realizada pela *SolarWord*, onde os módulos silício cristalino são calcinados a 600 °C, estratégia que impede a degradação do semicondutor. Posteriormente há a separação manual em correntes de vidro, metais e semicondutores. Por fim os semicondutores são purificados por fresagem química, recuperando 95% deles, além de recuperar 90% do vidro.

A *SASIL*, uma companhia italiana desenvolveu uma planta em escala piloto para a reciclagem de módulos c-Si, a técnica faz uso de etapas de separação química e mecânica, sua capacidade é de uma ton/h e 8000 ton/ano, todo o processo foi chamado de *FRELP*. Com ele é possível recuperar 94% da prata, 99% do cobre, 95% do silício metálico, 99% do alumínio e 98% do vidro (PRADO, 2018).

Por fim, Prado (2018) apresenta o órgão *PV CYCLE*, que dispõe de dois projetos distintos focados na reciclagem de módulos fotovoltaicos, após sua vida útil. Primeiro o *Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (FRELP)*, onde é dado suporte a projetos enfatizados em reduzir os gastos energéticos durante a reciclagem dos painéis FV. Segundo o *Photovoltaic*

Mobile Recycling Device (PV MOREDE), onde é elaborada uma unidade móvel de reciclagem.

Em seu trabalho Prado (2018) destaca a coleta dos resíduos, especifica as rotas de processamento economicamente viáveis e a ausência de uma legislação específica como os desafios para a implementação da reciclagem dos módulos FV em larga escala.

Segundo Scolla (2020), economicamente falando a reciclagem dos módulos de primeira geração não é atrativa, já que o preço de revenda de materiais como o cobre e o alumínio é reduzido comparado ao custo total da reciclagem. Sua reciclagem se dá apenas por uma preocupação e responsabilidade ambiental, porém não foi considerada a recuperação da prata presente nos resíduos fotovoltaicos.

Existem alguns obstáculos para que a reciclagem dos resíduos FV seja implementada, um deles é a viabilidade financeira, além da quantidade reduzida de resíduos que são produzidos atualmente os custos para os processos de reciclagem são elevados, em muitos casos destinar os resíduos FV aos aterros é mais barato que reciclá-los. Outro ponto que merece destaque é o fato das tecnologias usadas para a reciclagem não podem ser usadas para as diversas tecnologias empregadas nas células fotovoltaicas e poucas são automatizadas para uma escala de produção industrial (SCOLLA, 2020).

Com o passar dos anos a preocupação sobre o assunto está mais abrangente em relação aos componentes presentes nos módulos de primeira geração, hoje em dia o interesse está em recuperar a maior quantidade possível de materiais presente nos painéis enquanto que no início da reciclagem desses materiais a preocupação era limitada à recuperação do semicondutor (silício). A busca do aperfeiçoamento do processo de reciclagem do silício e depois com a sua consolidação, foi possível focar nos outros materiais dos resíduos FV, hoje se busca o aperfeiçoamento dos processos para recuperação desses outros componentes (DIAS *et al.*, 2016).

Segundo Anselmo (2019), o valor do material recuperado a partir da reciclagem e do tratamento dos módulos fotovoltaicos pode chegar até US\$ 450 milhões até 2030, valor equivalente a matéria-prima necessária atualmente para a produção de 60 milhões de novos painéis FV, que equivalem a 18 GW. O maior componente em porcentagem dos módulos FV (cerca de 80%) é o vidro, seu preço médio no mercado, considerando um material secundário é de US\$ 30-50/ton, já seu valor recuperado é de US\$ 28 milhões, isso considerando o estimado que até 2030 haverá um acúmulo de 960000 toneladas de vidro oriundo dos módulos FV.

Seguindo a proporção haverá cerca de 75000 toneladas de alumínio e 7000 toneladas de cobre, depois de reciclados o valor dos dois materiais combinados pode chegar até US\$ 140 milhões. A quantidade de silício aplicada aos módulos fotovoltaicos vem diminuindo com o passar dos anos, devido o aumento da sua eficiência, estima-se que até 2030 serão produzidas 30000 toneladas de silício oriundo dos resíduos FV, quando recuperados podem gerar mais de 45 milhões de novos módulos, cerca de US\$ 380 milhões (ANSELMO, 2019).

Para 2050 é estimada uma quantidade cumulativa de 78 milhões de toneladas de painéis FV no fim de sua vida útil, caso seja aproveitado poderá ser produzido 2000 milhões de módulos FV novos, o que corresponde a 630 GW (GIL *et al.*, 2019).

4.2 Gestão do fim da vida útil dos módulos FV no mundo

Após o crescimento do mercado energético proveniente da energia solar fotovoltaica, alguns fabricantes na Europa já iniciaram as pesquisas referentes ao ciclo de vida das placas FV, incluindo as tecnologias para a reciclagem desses resíduos. Porém a destinação final correta desses resíduos foi deixada de lado, e a atenção se voltou para a crescente demanda da produção dos módulos. Dessa forma, a União Europeia elaborou uma regulamentação onde garantia condições iguais a todos os participantes no mercado, assegurando a coleta dos resíduos após sua vida útil bem como sua reciclagem (SCOLLA, 2020).

Assim como no Brasil, os módulos FV também são classificados como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) pela União Europeia, de acordo com Prado (2018). Em Bruxelas, foi criada em 2007 a PV CYCLE, uma organização sem fins lucrativos, oferecendo opções em larga escala para a coleta e gerenciamento de resíduos na Europa. A organização apresentava um programa voluntário de coleta e reciclagem. Segundo Soares (2017) a PV CYCLE atingiu uma taxa de reciclagem de 96% dos módulos FV de silício em 2016.

A norma da União Europeia fornece aos produtores as seguintes responsabilidades: financeira, os fabricantes devem cobrir os custos de coleta e reciclagem do produto, incluindo os pontos de coleta públicos e os locais para tratamento primário dos módulos FV; reportar mensal ou anualmente os dados referentes à venda, ao retorno, à destinação, ao tratamento dos painéis FV, bem como os resultados dos processos de reciclagem dos resíduos; e informar ao consumidor quais módulos e onde eles devem ser descartados, além de avisar a empresa de

tratamento de resíduos sobre a forma de como lidar com os módulos na coleta, armazenamento, desmonte e tratamento (SOARES, 2017).

Já nos Estados Unidos não há leis federais referentes ao destino final dos resíduos dos módulos FV, de acordo com Scolla (2020), porém o Estado da Califórnia já iniciou o desenvolvimento de uma legislação para a gestão dos painéis FV após sua vida útil. A princípio a lei que está sendo desenvolvida caracteriza o produtor como responsável pelo gerenciamento do descarte das placas FV, tal responsabilidade é definida como responsabilidade estendida, onde os produtores e distribuidores são estimados a desenvolver novos designs de produtos de forma que reduza os impactos ao meio ambiente durante toda a sua vida útil. Além disso, o valor referente ao descarte já deve estar incluso no custo final do produto.

Segundo Prado (2018), os Estados Unidos classificam os módulos FV como resíduos perigosos, quando esses não passam no teste de toxicidade realizado pelo órgão ambiental. Esse teste avalia o potencial de contaminação ao meio ambiente pelos metais como a prata e o chumbo, componentes dos painéis fotovoltaicos.

4.3 Propostas para implantação da reciclagem de sistemas fotovoltaicos no Brasil

A energia solar pode ser considerada uma tecnologia recente no Brasil, logo o país ainda não apresenta uma legislação específica sobre a destinação correta dos resíduos fotovoltaicos (GHIZONI, 2016). Na Europa como existem sistemas fotovoltaicos se aproximando do fim das suas vidas úteis, a preocupação com a reciclagem desses materiais já existe. Como o impacto ambiental ocasionado pelas usinas solares é reduzido e a reciclagem dos módulos é de grande facilidade, o mais provável é que o próprio mercado se responsabilize pela reciclagem dos módulos, sem a necessidade de uma legislação especificada para o assunto (ABSOLAR, 2021).

O esperado é que a energia solar fotovoltaica cresça cada vez mais, segundo Ghizoni (2016), a estimativa é de que em 2050 os módulos fotovoltaicos serão responsáveis por 13% de todo o abastecimento residencial do país. Logo haverá também o crescimento dos resíduos fotovoltaicos, fazendo-se necessárias leis acerca do assunto, de forma que seja possível o enfrentamento dos problemas a médio e longo prazo, além de garantir a prevenção ambiental,

através da redução de substâncias tóxicas utilizadas nos módulos ou fiscalizando a gestão dos resíduos FV.

No geral os resíduos no Brasil são classificados pela ABNT, segundo a NBR 10004 (2004), onde são apresentadas a periculosidade e a destinação correta para eles. Dessa forma, na classe I estão os resíduos perigosos, IIA os não perigosos e não inertes e IIB os não perigosos e inertes. Como os módulos FV, após sua vida útil não são contemplados pela NBR 10004 (2004), eles são sujeitos a ensaios de lixiviação, uma técnica semelhante às realizadas nos Estados Unidos, esses ensaios avaliam a concentração de metais no lixiviado, principalmente a prata, o chumbo e o cobre, sendo o limite máximo do lixiviado de 5 mg/L para a prata e 1 mg/L para o chumbo (PRADO, 2018).

Segundo Anselmo (2019), se pequenas quantidades de módulos fotovoltaicos passarem nos testes de lixiviação esses podem ser levados para aterros sanitários sem causar riscos ao meio ambiente.

Em especial, o estado de São Paulo apresenta uma lei desde 2009, onde prescreve que os fabricantes, importadores e distribuidores são os responsáveis pelos resíduos gerados pelos seus próprios produtos (PRADO, 2018).

Uma forma muito importante relacionada à reciclagem desses materiais é através da logística reversa. Entre as vantagens que o sistema de logística reversa pode proporcionar pode-se destacar: geração de novos empregos; agregar mais valor ao produto; e estímulo de novas iniciativas voltadas ao reaproveitamento dos materiais, gerando retornos consideráveis para os fabricantes, já que o custo do produto final e das próprias empresas seria menor, pois seriam realizados menos gastos com a aquisição da matéria-prima (GHIZONI, 2016).

De acordo com Soares (2017) a logística reversa possui cinco funções básicas: implantação, controle do fluxo tanto de materiais como de informações e planejamento; procura pelas melhores formas de utilizar os recursos; recuperação viável; direção dos produtos indo para o produtor a partir do consumidor; e segurança na destinação final dos produtos.

Em seu trabalho de conclusão de curso Ghizoni (2016) apresenta uma proposta para a logística reversa no Brasil. Nela é de responsabilidade dos fabricantes/importadores, das usinas fotovoltaicas e das unidades autônomas produtoras de energia solar (compartilhada entre as três partes citadas) o transporte dos módulos FV ao seu destino final e a responsabilidade de devolver o material reciclado para o mercado ou fornecer a destinação correta dos resíduos finais é da indústria de reciclagem.

A autora ainda caracteriza as responsabilidades de cada um dos setores envolvidos nesse processo. O consumidor deve requisitar a remoção dos módulos FV no local. O fabricante/importador se responsabiliza pela parte financeira referente aos custos de implantação e operação do sistema de logística reversa, além de se incumbir também da parte de gestora da logística reversa (se vinculando a uma empresa externa ou se tornando a própria gestora do processo). A gestão do sistema delega funções como: gerenciar o recolhimento dos materiais, contratar e acompanhar o serviço de reciclagem e informar aos órgãos fiscalizadores acerca do fluxo dos processos de logística. Para a indústria de reciclagem cabe sua certificação junto aos órgãos fiscalizadores, fornecer as informações acerca das performances dos processos de reciclagem e efetuar as formas corretas de reciclagem e disposição final. Por fim, ao poder público competem os seguintes compromissos: proporcionar à todos a conscientização sobre o assunto, fiscalizar e impor metas de reciclagem, fornecer financiamentos para infraestrutura das indústrias de reciclagem, incentivar a fabricação de módulos com maiores quantidades de componentes reciclados, recicláveis e que apresentam maior facilidade para a reciclagem e divulgar editais com o objetivo de incentivar pesquisas para desenvolver novas tecnologias voltadas para a logística reversa dos resíduos FV (GHIZONI, 2016).

Ghizoni (2016) apresenta alguns motivos que influenciam no progresso do processo de logística reversa, são eles: processos esquematizados e padronizados, sistema de informação e controle, eficiência do sistema de controle, rede logística estruturada, adequada infraestrutura e colaboração entre os fornecedores e os consumidores. Os fatores apresentados devem estar interligados entre si, ou seja, a incapacidade de um pode acarretar no prejuízo de todo o processo da logística reversa.

Para Scolla (2020) o desenvolvimento de um sistema apropriado para o descarte dos resíduos fotovoltaicos é uma atividade multidisciplinar. Onde devem ser considerados os pontos geográficos e socioculturais do país, além das questões legais e econômicas, do contrário a implantação de tal sistema não será possível.

No referente aos aspectos geográficos e socioculturais há uma influência na logística reversa. Scolla (2020) discorre mais a fundo sobre esse ponto, o Brasil apresenta a quinta maior área superficial do mundo, possuindo diferenças culturais e regionais, o que influenciam nos diversos cenários onde os painéis FV são implementados. Os módulos podem estar instalados em fazendas, nos telhados de residências das grandes cidades ou até mesmo locais sem rede elétrica, essa dimensão e diversidade dificulta a logística reversa, causando um cenário complexo para o descarte final correto das placas FV ao fim de sua vida útil.

Dessa forma, a tarefa de centralizar um sistema de gestão responsável pela coleta e destino final dos resíduos FV para regiões tão diversas é complicado.

A autora Scolla (2020) ainda complementa ao afirmar que as questões sobre a inserção da educação ambiental e a infraestrutura necessária para tal atividade dificultam a realização da logística reversa. Quando se nota que apenas 18% dos municípios brasileiros apresentam coleta seletiva, fica claro a falta de atenção que o poder público tem com as questões ambientais. Assim, o esperado é que diversas dificuldades apareçam durante a trajetória da implantação de um sistema de descarte adequado dos módulos FV ao fim de sua vida útil, vale destacar a significância desse programa já que os painéis FV apresentam em suas composições componentes perigosos.

A seguir são apresentados alguns pontos que devem ser contemplados pelo poder público, tanto legislativo como executivo, de acordo com Ghizoni (2016), na elaboração de uma legislação sobre os resíduos FV, sua reciclagem e logística reversa:

- A vida útil mínima dos módulos fotovoltaicos;
- A reprovação do descarte dos resíduos fotovoltaicos sem ter sido sujeito ao tratamento;
- Políticas de incentivo ao desenvolvimento de energias limpas e renováveis;
- Desenvolver normas complementares incluindo a valorização, reciclagem e reutilização dos resíduos FV;
- Implantação de um sistema de logística reversa;
- Penalidade para os produtores que não cumpram as medidas socioambientais e de gestão dos resíduos FV;
- Apresentar opções de tratamentos específicos para a reciclagem dos resíduos FV, de forma que valorize os produtos, garantindo a saúde humana e sem agressões ao meio ambiente;
- Aponte a responsabilidade aos produtores/distribuidores de garantir que os módulos sejam entregues a eles, após o fim da sua vida útil;
- Segurança ao transportar os resíduos FV coletados, garantindo as melhores condições de reutilização, reciclagem e proteção das substâncias perigosas presentes nos módulos;
- Fornecer informações sobre os componentes dos módulos FV, facilitando a gestão dos resíduos.

Quanto às questões legais, Scolla (2020) apresenta a responsabilidade compartilhada e o direito fundamental ao meio ambiente. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos a responsabilidade do ciclo de vida dos produtos é compartilhada, sendo ela caracterizada pela logística reversa e o destino final dos resíduos. É de responsabilidade do gerador direto do resíduo o seu gerenciamento, envolvendo a coleta dos produtos após sua vida útil e a destinação final correta. Além disso, se faz necessário a logística reversa para os resíduos eletrônicos e seus componentes, e de acordo com a classificação apresentada, isso engloba as placas fotovoltaicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma síntese sobre o funcionamento das placas fotovoltaicas, como elas são fabricadas e quais os seus componentes. Informações cruciais para o desenvolvimento de pesquisas acerca da reciclagem dos resíduos FV, uma vez que o conhecimento do material é determinante para a escolha das técnicas mais adequadas para sua reciclagem. Além disso, também foram expostos os impactos ambientais que os módulos FV podem vir a ocasionar caso tenham um destino incorreto, mesmo que ainda não existam dados exatos dessas ocorrências, devido à elevada vida útil deles.

Com as técnicas e processos de reciclagem apresentados nesse trabalho fica claro a necessidade de sua implantação em maior escala, para assim evitar prejuízos ambientais e evitar o uso descontrolado de suas matérias-primas direto da fonte que não apresentam uma reposição na mesma escala da necessidade de produção de módulos fotovoltaicos. É evidente que suas implantações são viáveis e cruciais para a continuidade do uso da energia solar fotovoltaica.

Com a criação de regulamentações e leis públicas aplicadas à reciclagem de resíduos FV e determinando a responsabilidade da destinação final desses materiais nos outros países fica evidente a sua funcionalidade e necessidade de tal regulamento. Assim como a aplicação de algumas técnicas de reciclagem já realizadas por algumas empresas do ramo de fabricação de módulos fotovoltaicos.

Neste trabalho foi apresentada uma proposta para o Brasil com os principais pontos que devem ser observados durante a elaboração de uma legislação específica sobre os resíduos FV e suas reciclagens, através da logística reversa, muitos desses pontos são baseados em regulamentações que já estão em funcionamento e apresentam bom desempenho na União Europeia. No mais, o país já possui leis rigorosas no referente à proteção da fauna e da flora, exigindo medidas mitigadoras e precauções para evitar e/ou minimizar os impactos ambientais causados pelos grandes empreendimentos.

Conclui-se que a logística reversa é a principal opção para o desenvolvimento da destinação correta dos resíduos fotovoltaicos, existem diversas técnicas e processos de reciclagem executáveis, assim cada empresa pode escolher aquela que melhor responde aos seus objetivos. O poder público deve sempre fiscalizá-las para garantir o cumprimento da reciclagem e destinação correta, e garantir que pessoas com o conhecimento do assunto realizarão essas fiscalizações. Os principais impactos ambientais causados pelos módulos FV

acontecem ao fim de sua vida útil, dessa forma com a prática da reciclagem essa fonte renovável se torna ainda mais limpa.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABSOLAR – **A reciclagem de painéis solares tem um longo caminho a percorrer, e o silício pode ser a chave**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/a-reciclagem-de-paineis-solares-tem-um-longo-caminho-a-percorrer-e-o-silicio-pode-ser-a-chave/> Acessado em: 27/07/2021.

ABSOLAR – **Painéis solares: mitos e verdade sobre o descarte de equipamentos**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/paineis-solares-mitos-e-verdades-sobre-o-descarte-dos-equipamentos/> Acessado em: 27/07/2021.

ACÇÃO BRASIL – **O novo cenário para a prata**. 2020. Disponível em: <https://acaob.com.br/o-novo-cenario-para-a-prata/>. Acesso em: 22/08/2021.

ALDO. **Reciclagem de painéis solares já é realidade na ALDO**. 2020. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/reciclagem-de-paineis-solares-ja-e-realidade-na-aldo/>. Acesso em: 22/08/2021.

ANSELMO, Antonio Harley. **Reciclagem ou destinação final do painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida**. 2019. Monografia (Especialidade em Fontes Renováveis) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.

BARROS, Murillo Vetroni. **Avaliação do ciclo de vida de geração de energia elétrica no Brasil: histórico e perspectivas futuras em termos de aquecimento global**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017.

BENEVIT, Mariana Gonçalves; DIAS, Pablo Ribeiro; VEIT, Hugo Marcelo. **Painéis solares fotovoltaicos de silício cristalino: métodos químicos de separação de componentes**. 2014. IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Rio Grande do Sul, 2014.

BETTANIN, Andrea. **O uso de tiosulfato para a recuperação de prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. 2017. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2017.

BÜHLER, Alexandre José; SANTOS, Fernando Hoefling dos; GABE Ivan Jorge. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais**. 2018. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Gramado, 2018.

CANAL SOLAR. **Materiais fotovoltaicos começam a ser reciclados no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/mateiras-fotovoltaicos-comecam-a-ser-reciclados-no-brasil/>. Acesso em: 22/08/2021.

CHOWDHURY, Md. Shahariar; RAHMAN, Kazi Sajedur; CHOWDHURY, Tanjia; NUTHAMMACHOT, Narissara; TECHATO, Kunaan; AKHTARUZZMAN, Md.; TIONG,

Sieh Kiong; SOPIAN, Kamaruzzaman; AMIN, Nowshad. **An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.** 2020. Energy Strategy Reviews 27 100431, 2020.

COSTA, Glênea Rafaela de souza; MARTINS, Denilson do Socorro Pinheiro; SILVA, Abraão Smith Pinho da; FERREIRA, João Carlos da Silva. **Impactos ambientais causados pelos painéis solares: percepção dos discentes da UFRA – Campus Belém – PA.** 2019. Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 6, n.30, p. 336-345. 2019.

CRUZ, Fernanda Tátia; ISIDRO, Marcelo Henrique; FERNANDES, Igor Santos e. **Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos.** 2020. Curitiba, v. 6, n. 9, p. 73294-73309. 2020.

CURTIS, Taylor; HEATH, Garvin, WALKER, Andy; DESAI, Jal; SETTLE Edward; BARBOSA, César. **Best practives at rhe endo f the photovoltaic system performance period.** 2021. Technical Report NREL/TP-5C00-78678. 2021.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares).** 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Engenharia de Minas, metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DIAS, P. R.; BENEVIT, M. G.; VEIT, H. M. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos de silício cristalino – novas tendências.** 2016. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, 22°CBECiMat, p.7489-7500. 2016.

GIL, Luís; ISIDRO, João. **O fim de vida dos módulos fotovoltaicos.** 2019. Renováveis maganize. Dossier sobre solar fotovoltaico, n.39. 2019.

GHIZONI, Joana Pauli. **Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil.** 2016. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

HINZ, Roberta Tomasi Pires; VALENTINA, Luiz V. Dalla; FRANCO, Ana Cláudia. **Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela avaliação do ciclo de vida.** 2006. Estudos tecnológicos v.2, n. 2, p. 91-98. 2006.

ELY, Fernando; SWART, Jacobus W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração.** 2014. Espaço IEEE – O setor elétrico, outubro de 2014, p.138-139. 2014.

IEA – **Life cycle inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe.** 2017. Photovoltaic Power Systems Programme. Report IEA-PVPS T12-12:2017.

ISO 14040. **Gestão ambiental – avaliação do de vida – princípios e estrutura.** 2001.

KUMAR, E. Suresh; SARKAR, Bijan. **Fault tree analysis of failures in fire detection system of grid connected photovoltaic system.**2013. International Journal og Engineering and Advanced Technology (IJEAT), ISSN:2249-8958, v.8, Issue. 3.2013.

LARA, Simone dos Santos. **A abordagem da avaliação do ciclo de vida aplicados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede no município de Cacoal e Pimenta Buena – RO.**

2018. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção). Universidade Federal de Rondônia, Cacoal. 2018.

LIN, Ching-Hsi; HSU, Shih-Peng.; HSU, Wei-Chig. **Silicon solar cells: structural properties of Ag-contacts/Si-substrate**. 2011. In: Kosyachenko, L. A. *Sollar Cells – Silicon Water-Based Technologies*. Ed. InTech, p. 93-110, 2011.

MIRANDA, Rosana Teixeira; LEANDRO, Francielle da Silva; SILVA, Tatiane Caetano. **Gestão do fim de vida de módulo**. 2019. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 8, n. 1, p.364-383, 2019.

MOURAD, Anna Lúcia; GARCIA, Eloísa Elena Corrêa; QUEIROZ, Guilherme de Castilho; GATTI, Jozeti Barbutti; COLTO, Leda; JAIME, Sandra Balan Mendoza. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. 2007. CETEA/ITAL, Campinas, 2007.

NÚCLEO DO CONHECIMENTO – **Panorama nacional da prata entre 2010 e 2014**. 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/quimica/prata>. Acesso em: 22/08/2021.

OLIVEIRA, Adriana de Souza. **Avaliação de impactos ambientais do módulo fotovoltaico: produção e uso como fonte de energia elétrica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PORTAL SOLAR – **Passo a passo da fabricação da célula fotovoltaico**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-da-celula-fotovoltaica.html>. Acesso: 22/08/2021.

PORTAL SOLAR. **Energia solar fotovoltaica: impactos ambientais**. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-impactos-ambientais>. Acesso em: 26/06/2021.

PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PUPIN, Priscila Carvalho. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida**. 2019. Dissertação (Mestre em Engenharia de Energia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SCOLLA, Minéia. **Avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia fotovoltaica: uma análise sob a ótica de fatores ambientais**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020.

SILVER, Price.org. **Price of Silver**. 2021. Disponível em: <https://silverprice.org/pt/silver-price-per-kilo.html>. Acesso em: 03/06/2021.

STEINER, Kátia Helena. **Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2020.

STRACHALA, Dávid; HYLKY, Josef; VANEK, Jiri; FAFILEK, Günter; JANDOVA, Kristyna. **Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction.** 2017. *Acra Montanistica Slova* v. 22, n.3, p. 257-269. 2017

SOARES, Rebeca Araújo. **Logística reversa dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SUNR. **Reciclagem fotovoltaica. A energia solar ainda mais renovável. Seleção.** 2021. Disponível em: SunR - Reciclagem Fotovoltaica - SunR - Reciclagem Fotovoltaica Acesso em: 09/09/2021.

TAKII, Laryssa Akemi. **Avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida de painéis solares fotovoltaicos usando a metodologia de ACV.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. (Especialização em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

WECKEND, Stephanie; WADE, Andreas; HEATH Garvin. **End-of-life management: solar photovoltaic panels.** 2016. IRENA e IEA-PVPS, TI2-06-2016, 2016.