

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Especialização em Fontes Renováveis:  
Geração, Operação e Integração

**RECICLAGEM OU DESTINAÇÃO FINAL DOS PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM GERAÇÃO DE  
ENERGIA AO FINAL DO CICLO DE VIDA**

**ANTONIO HARLEY ANSELMO**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do *Certificado de Especialista em Fontes Renováveis*.

Orientador: Prof. DAVIES WILLIAM DE LIMA MONTEIRO

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

A618r

Anselmo, Antonio Harley.

Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida [recurso eletrônico] / Antonio Harley Anselmo. – 2019.

1 recurso online (56 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Davies William de Lima Monteiro.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes renováveis: geração, operação e integração da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia renovável. 3. Cádmiio. 4. Impactos ambientais. 5. Reciclagem. 6. Resíduos. I. Monteiro, Davies William de Lima. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



## ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO ANTONIO HARLEY ANSELMO

Realizou-se, no dia 05 de dezembro de 2019, às 14:40 horas, Sala de Seminários 1012 - Escola de Engenharia da UFMG, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *RECICLAGEM OU DESTINAÇÃO FINAL DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM GERAÇÃO DE ENERGIA AO FINAL DO CICLO DE VIDA*, apresentada por ANTONIO HARLEY ANSELMO, número de registro 2018704030, graduado no curso de ENGENHARIA CIVIL, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Davies William de Lima Monteiro - Orientador (UFMG), Prof(a). Wadaed Uturbey da Costa (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada


Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 05 de dezembro de 2019.

  
Prof(a). Davies William de Lima Monteiro ( Doutor )

  
Prof(a). Wadaed Uturbey da Costa ( Doutora )

  
Secretaria do Curso de Especialização em  
Fontes Renováveis - Geração, Operação  
e Integração

ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS: GERAÇÃO, OPERAÇÃO E  
INTEGRAÇÃO

*"RECICLAGEM OU DESTINAÇÃO FINAL DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS  
APLICADOS EM GERAÇÃO DE ENERGIA AO FINAL DO CICLO DE VIDA"*

*ANTONIO HARLEY ANSELMO*

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Aprovada em 5 de dezembro de 2019.

Por:

---

Prof. DAVIES WILLIAM DE LIMA MONTEIRO  
(Orientador)

---

Prof.<sup>ª</sup> WADAED UTURBEY DA COSTA  
(Relator)

## **Dedicatória**

Primeiramente dedico esse trabalho a minha esposa Regina, meus filhos Pedro Henrique e Isabela e a Bruna, que sempre me incentivaram nessa jornada. Sem este incentivo, jamais teria conseguido.

Além deles, dedico esse trabalho ao Engenheiro Harley Anselmo e a Dona Rosa, meus pais, que sempre iluminaram o meu caminho profissional e pessoal.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”*

*Oliver Wendell Holmes Sr.*

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço a Escola de Engenharia da UFMG, através do Professor Victor Flores por permitir meu retorno a universidade após 32 anos da graduação.

Também agradeço a todo o corpo docente desta especialização, através do Professor Davies William, meu orientador.

E finalmente a todos os colegas que juntos terminamos esta etapa do crescimento de nosso conhecimento.

## Resumo

O setor de energia está passando por uma mudança radical e gradual para o fornecimento de energia renovável. No entanto, nem tudo o que parece sustentável permanece assim em todo o seu ciclo de vida. Pelo menos essa é a preocupação mais comum em relação aos painéis solares fotovoltaicos (PV) principalmente na Europa, Estados Unidos e Japão. Os sistemas fotovoltaicos estão sendo implantados muito rapidamente no mundo, e não é diferente no Brasil. A capacidade de PV cumulativa no final de 2018 ultrapassou os 500 GWp no mundo (IEA PVPS, 2019). Eles são uma fonte sustentável de energia, que depende apenas da radiação solar para fornecer eletricidade. No entanto, o que acontece com os painéis solares quando eles não são eficientes e chegam no final de seu ciclo de vida?

No Brasil, onde a capacidade de PV cumulativa totalizou 2,4 GWp no final de 2018 (ABSOLAR, 2019), ainda não existem políticas e normas que determinem qual será o destino destes resíduos, tema que deve ser debatido desde já.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma projeção do crescimento do uso de painéis fotovoltaicos, assim como uma projeção de produção de resíduos, alertar para os impactos socioambientais causados por este crescimento, e apresentar tecnologias de reciclagem já utilizadas, bem como a possibilidade de criação de valor econômico e ambiental provenientes destes processos.

## **Abstract**

The energy sector is undergoing a radical and gradual shift towards renewable energy supply. However, not everything that seems sustainable stays that way at the end of its life cycle. At least that is the most common concern for photovoltaic (PV) solar panels, especially in Europe, the United States, and Japan. Photovoltaic systems are being deployed very rapidly in the world, and not differently in Brazil. Cumulative PV capacity at the end of 2018 exceeded 500 GWp in the world (IEA PVPS, 2019). They are a sustainable source of energy that relies only on solar radiation to provide electricity. However, what happens to solar panels when they are not efficient and reach the end of their life cycle?

In Brazil, where cumulative PV capacity totaled 2.4 GWp at the end of 2018 (ABSOLAR, 2019), there are no policies and norms to determine the destination of this waste, a topic that should be debated right now.

This document aims to present a projection of the growth of the use of photovoltaic panels, to alert to the social and environmental impacts caused by this growth, and to present recycling technologies already used, as well as the possibility of creating economic and environmental value from these processes.



## Lista de Figuras

Figura 1 - A "curva de aprendizado" (curva de experiência de preço) para módulos fotovoltaicos (A. JAGER-WALDAU) .....	15
Figura 2- Evolução anual da instalação de painéis fotovoltaicos .....	22
Figura 3 - Capacidade global instalada até 2018 .....	23
Figura 4 Abordagem para quantificar os resíduos de painéis fotovoltaicos.....	24
Figura 5 - Projeções para 2030, foi utilizado o REmap .....	25
Figura 6 - Projeções são baseadas no Roteiro de Tecnologia da IEA .....	25
Figura 7- Capacidade PV acumulada global projetada .....	26
Figura 8 - Modo de desperdício do painel fotovoltaico em duas etapas (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016) .....	28
Figura 9 - Ajuste exponencial da curva de projeção da relação peso / potência do painel fotovoltaico (t/MW).....	29
Figura 10 - Taxas de falha de acordo com as reclamações dos clientes.....	30
Figura 11- Cenários de resíduos fotovoltaicos para a etapa 2 .....	32
Figura 12 - Fator de Forma Definição (ZILLES, MACEDO, et al., 2012).....	34
Figura 13 - Exemplo de curva de Weibull com dois fatores de forma diferentes .....	36
Figura 14 - Resultados acumulados de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050 .....	37
Figura 15 – Curva Massa x resíduo .....	38
Figura 16 - As etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos.....	40
Figura 17 - Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino. ....	44
Figura 18 - Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe.....	45
Figura 19 - A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV (Concept Vasilis Fthenakis) .....	46
Figura 20 - Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030.....	48

Figura 21 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030.....	49
Figura 22 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050.....	50
Figura 23 - Expansão Indicativa de Referência – PDE 2029 .....	51

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1- Principais tecnologias usadas na indústria fotovoltaica .....	19
Tabela 2 - Capacidade PV acumulada projetada, 2015-2050, com base em IRENA (2016) e IEA (2014) .....	27
Tabela 3 - Visão geral dos fatores de forma Weibull relatados na literatura para modelar a probabilidade de perda do painel fotovoltaico juntamente com os valores de base selecionados para uso no estudo .....	35
Tabela 4 - Resultados modelados dos volumes acumulados estimados de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida por país (t) .....	39

## Abreviaturas

CAISO – California Independent System Operator

PV – Painéis Fotovoltaicos

CdS – Sulfídio de Cádmio

CdTe – Telureto de Cádmio

CIGS – Seleneto, Índio, Gálio e Cobre

GWP – Global Warming Potencial

PA – Potencial de Acidificação

HTP – Potencial de Toxicidade Humana

ADP – Potencial de Deplação de Recursos Abióticos

a-Si – Silício Amorfo

C-Si – Silício Cristalino

IEA – International Energy Agency

GW – Gigawatt

MW – Megawatt

Wp – Watt pico

IRENA – International Renewable Energy Agency

UNEP – United Nation Environment Program

RoHs – Restriction of Hazardous Substances

WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment

UE – União Europeia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

## Sumário

1. Introdução .....	10
2. A Energia Fotovoltaica .....	13
2.1. Histórico .....	13
2.2. Módulos fotovoltaicos – Tecnologias.....	16
3. Gestão dos painéis fotovoltaicos ao final do ciclo de vida (LCA).....	19
3.1. Mercado global de painéis fotovoltaicos .....	19
3.2. Capacidade total instalada no mundo .....	22
3.3. Projeção da produção de resíduos devido ao uso de painéis fotovoltaicos ...	23
3.4. Perspectivas globais de resíduos de painéis fotovoltaicos.....	36
3.5. Projeções de resíduos por país.....	38
4. Impactos Ambientais.....	40
5. Tecnologias de reciclagem .....	42
5.1. Criação de valor com a reciclagem dos painéis fotovoltaicos.....	47
6. O Cenário no Brasil.....	51
7. Conclusão .....	52
8. Referências Bibliográficas .....	53

## 1. Introdução

Estamos passando por uma revolução solar. As indústrias de energia fotovoltaica apresentaram um grande crescimento na década passada, crescendo quarenta vezes em todo o mundo de 2008 a 2018, com poucos sinais de desaceleração. Mais de 99,9% de todos os módulos fotovoltaicos e usinas de energia solar concentrada foram instaladas após 2008. Em 2008, a indústria fotovoltaica produziu 170 megawatts em módulos, suficientes para abastecer 250.000 mil de residências. No final de 2018, as instalações fotovoltaicas cumulativas ultrapassavam os 500 gigawatts (GW), mais de mil vezes a produção anual da década anterior e o suficiente para abastecer mais de duzentos milhões de casas (MULVANEY, 2019). Já se pode dizer que a energia solar não é mais uma energia alternativa. Novos recordes de geração solar são quebrados todos os meses na Califórnia, Alemanha, China, e no Brasil. As tecnologias elétricas solares - tecnologias fotovoltaicas e de energia solar concentrada, como vales parabólicos e torres de energia solar - estão dando contribuições significativas ao fornecimento de eletricidade em alguns lugares, embora geograficamente desigual, em todo o mundo. Em 2017, a energia solar forneceu mais de 50% do pico de eletricidade na Alemanha e na Califórnia. (CAISO CALIFORNIA INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR, 2016) Esses recordes serão quebrados repetidamente à medida que mais energia solar for instalada.

Hoje, a energia solar permanece uma pequena porção do suprimento geral de energia. Em junho de 2015, a energia solar ultrapassou 1% do suprimento total de energia em todo o mundo (MULVANEY, 2019). Os especialistas afirmam que o maior período de crescimento da energia solar está no futuro. Com base nas taxas de crescimento desde 2009, essa perspectiva já está se formando. No entanto, nem todos os especialistas em energia compartilham essa visão, principalmente devido aos impactos ambientais.

Do ponto de vista dos estudos ambientais, as maneiras como o desenvolvimento da energia solar se desenrolarão poderão trazer benefícios e impactos importantes à sociedade e ao meio ambiente. Os benefícios sociais e ambientais da energia solar são normalmente incontestáveis quando comparados a outras fontes,

principalmente as de energia a partir de combustíveis fósseis, pois não há queima de combustível durante a operação de geração de energia, apresentando uma maior qualidade de vida e muito menos poluição do ar e emissões de gases de efeito estufa. No entanto, todas as formas de desenvolvimento de energia têm impactos ou representam riscos novos ou diferentes para comunidades, ecossistemas e paisagens específicos. A transição para a energia solar não é diferente, exigindo maiores mudanças no uso da terra, por exemplo: inibindo as atividades agropecuária, impactando em paisagens dentre outras, no beneficiamento do silício a partir da sílica e vários metais a partir de minas, processando em fundições, altos fornos, fábricas de vidro, plantas químicas (com seus efluentes). Explorar os desafios ambientais da expansão da produção fotovoltaica para o nível de terawatt pode ajudar a sociedade a planejar a mitigação de impactos ambientais e um melhor uso desta tecnologia durante a transição para o uso da energia solar.

Analistas da SunShot Initiative, um esforço liderado pelo Departamento de Energia dos EUA, estimam que, para atingir os níveis de fabricação de módulos fotovoltaicos em 20 GW por ano, a produção de materiais da cadeia de suprimentos precisaria aumentar 6% para o vidro, 520% para o polissilício, 38 % para telúrio, 160% para índio e 30% para prata, a partir dos níveis atuais (MULVANEY, 2019). Levar a energia solar a níveis de terawatt implica um aumento de cem vezes nesses números.

Os painéis fotovoltaicos são fontes de energia sem custo de combustível, entretanto com custo de produção relativamente ainda alto e são fabricados com materiais que são esgotáveis e ambientalmente inseguros. Alguns aspectos relativos à sustentabilidade devem ser considerados, como custo, disponibilidade de recursos e impacto ambiental. A questão do custo diz respeito à adequabilidade da energia solar em comparação com outras fontes de energia em todo o mundo e ao desenvolvimento da tecnologia. Os impactos ambientais incluem efeitos regionais e globais, bem como o impacto do uso da terra e da água, além da enorme quantidade de energia gasta na fabricação e de outros materiais e fontes, às vezes não renováveis, para a produção dessa energia. que

devem ser considerados em um contexto em um horizonte longo e de várias gerações. Finalmente, o uso excessivo e descontrolado desta tecnologia poderá comprometer a disponibilidade de recursos materiais e assim trazendo restrições para gerações atuais e futuras.

Mais concisamente, a energia fotovoltaica deve atender à necessidade de gerar eletricidade abundante a custos competitivos, conservando recursos para as gerações futuras e tendo impactos ambientais muito inferiores as atuais fontes de geração de energia e preferencialmente inferiores aos das opções alternativas de energia futura. Os desafios variam entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas. Por exemplo, os PVs de silício cristalino de primeira geração utilizam silício abundante, mas seus custos são relativamente altos. Em comparação, as tecnologias de filmes finos de segunda geração são mais baratas de fabricar, mas usam materiais que não são tão abundantes na natureza. No início, os módulos de filmes finos não eram tão eficientes quanto os de silício cristalino, mas a eficiência do telureto de cádmio já se aproxima da eficiência dos painéis de silício multicristalino (MULVANEY, 2019).

Os módulos de filmes finos de telureto de cádmio podem ser produzidos a um custo menor que os módulos de silício cristalino, pois exigem menos etapas no processo de fabricação e seu rendimento de produção é de cerca de 2,5 horas mais rápido que a de outros tipos de módulos fotovoltaicos, ou seja em um mesmo período de tempo pode-se produzir uma maior quantidade de módulos. No entanto, existem algumas preocupações sobre a disponibilidade de telúrio e a toxicidade do cádmio usado como precursor CdS e CdTe. A tecnologia (di) seleneto de gálio índio cobre (CIGS) compartilham essas preocupações sobre a disponibilidade de material (ex.: gálio, índio), e algumas tecnologias de silício de alto desempenho têm usado potentes gases de efeito estufa (GEE) (por exemplo, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>) além de outros gases tóxicos como diborano, arsina, fosfina, cloreto de hidrogênio, dentre outros, no processo de fabricação (FTHENAKIS, 2018).

Atualmente existem tecnologias de reciclagem disponíveis para os módulos fotovoltaicos de Si cristalino, de filme fino e CIGS. A reciclagem desses módulos



fotovoltaicos resulta em benefícios ambientais de acordo com o potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potencial*); potencial de acidificação (PA); potencial de toxicidade humana (HTP); e potencial de depleção de recursos abióticos (ADP) (FTHENAKIS, 2018).

Utilizando uma metodologia criada pela IRENA, este trabalho tem como objetivo apresentar uma projeção do crescimento do uso de painéis fotovoltaicos e dos resíduos produzidos durante todo o ciclo de vida dos painéis, e ainda alertar para os impactos socioambientais causados por este crescimento assim como apresentar as tecnologias de reciclagem já utilizadas, principalmente na Europa. O trabalho, também projeta a possibilidade de criação de valor econômico e ambiental provenientes dos processos de reciclagem que são apresentados no Capítulo 5.

## **2. A Energia Fotovoltaica**

### **2.1. Histórico**

No início da civilização, os seres humanos desenvolveram inúmeras engenhocas para aproveitar a energia do sol. Muitos apontam o "raio solar da morte", projetado pelo inventor grego Arquimedes, como um exemplo inicial de um dispositivo tecnológico projetado especificamente para aproveitar a energia solar para uso humano. O dispositivo pode ser mítico, e não histórico, mas, segundo alguns historiadores, os gregos usavam espelhos para concentrar a luz do sol, considerado como o primeiro exemplo de um sistema óptico adaptativo - o suficiente para queimar os mastros e velas dos navios de guerra. Outros usos iniciais do sol incluem a secagem de culturas, que provavelmente foram clonadas antes mesmo da agricultura sedentária e que são críticas para o armazenamento de alimentos. Esforços para aproveitar a energia solar na civilização humana não são novidade (MCEVOY, MARKVART e CASTANER, 2011).

A luz fascinou alguns dos maiores cientistas do mundo. Um dos mais famosos de todos, Isaac Newton (1642-1727), pensava nela como um fluxo de partículas, como bolas de bilhar em miniatura. Porém, no início do século XIX,

experimentos do polímata inglês Thomas Y Young e do físico francês Augustin Fresnel demonstraram efeitos de interferência nos feixes de luz, que incluem as faixas de cores frequentemente vistas na superfície das bolhas de sabão. Isso sugeria que a luz age como uma onda, semelhante às ondulações de um lago - uma teoria reforçada pelo trabalho de James Clerk Maxwell na década de 1860, mostrando que a luz visível faz parte de um espectro mais amplo de radiação eletromagnética.

O físico alemão Max Planck usou a teoria de Isaac Newton para explicar as características da radiação do corpo negro e, posteriormente, foi a base do trabalho de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico em 1905, pelo qual recebeu o Prêmio Nobel, no qual propôs que a luz fosse composta de pequenas partículas ou pacotes de energia conhecidos como fótons. O desenvolvimento subsequente da teoria quântica foi um dos grandes triunfos intelectuais do século XX. Assim, nossa visão moderna é que a luz tem uma dualidade essencial: para alguns propósitos, podemos pensar nela como um fluxo de partículas e, para outros, como um tipo de onda. Os dois aspectos são complementares e não contraditórios.

Os primórdios do PV remontam a 1839, quando o jovem físico Edmond Becquerel descobriu o efeito do PV ao iluminar um eletrodo em uma solução eletrolítica. Em 1877, as primeiras células fotovoltaicas de estado sólido haviam sido fabricadas a partir de selênio e posteriormente desenvolvidas como medidores de luz para fotografia. Embora um entendimento adequado dos fenômenos tenha sido fornecido pela teoria quântica, a aplicação prática a dispositivos fotovoltaicos úteis precisava aguardar a chegada da eletrônica semicondutora na década de 1950. Assim, houve um intervalo de mais de cem anos entre a descoberta inicial de Becquerel e o desenvolvimento do PV como o conhecemos hoje (FTHENAKIS, 2018).

Pode-se dizer que a era moderna da PV começou em 1954 com o trabalho de pesquisadores dos laboratórios Bell Telephone e RCA, que relataram novos tipos de dispositivos semicondutores, baseados em silício e germânio, que eram uma

ordem de magnitude mais eficientes que as células anteriores na conversão de radiação diretamente em eletricidade.

Em uma década de grandes expectativas para a energia nuclear, aconteceu a mudança de situação quase da noite para o dia quando foi lançado o primeiro satélite terrestre, o Sputnik da URSS, em 1957. Satélites e células solares - mesmo caras - foram feitos um para o outro. Os primeiros satélites precisavam apenas de uma quantidade muito modesta de eletricidade, e o peso e a área dos painéis solares necessários para produzir energia eram aceitáveis para os projetistas de satélites, apesar do alto custo destas células.

O otimismo da comunidade fotovoltaica foi renovado, principalmente com as tecnologias de Silício cristalino e filme fino da Telureto de Cádmio e com base nas previsões da "curva de aprendizado" (Figura 1), e ainda reforçado pelo primeiro "choque do petróleo" em 1973, quando os países produtores de petróleo decidiram aumentar muito o preço do petróleo bruto e exercer mais controle sobre o seu suprimento.

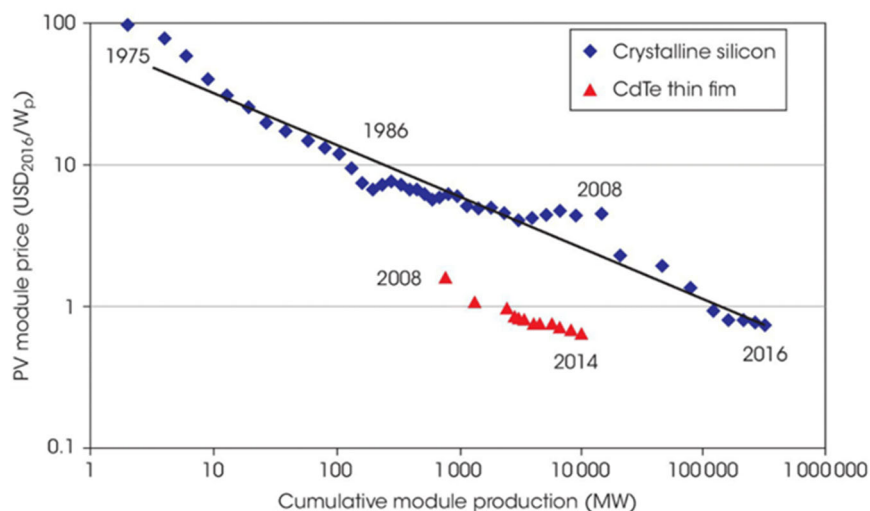


Figura 1 - A "curva de aprendizado" (curva de experiência de preço) para módulos fotovoltaicos (A. JAGER-WALDAU)

O ritmo da pesquisa, desenvolvimento e aplicação de PV para todas as tecnologias continua inabalável hoje. A crescente conscientização sobre o aquecimento global e o papel vital das energias renováveis no combate a ele garantiram que os governos de todo o mundo apreciassem a necessidade de

incentivar e estimular o PV, e estamos agora na era de vários gigawatts. Isso deve ter sido quase inimaginável meio século atrás.

## **2.2. Módulos fotovoltaicos – Tecnologias**

A energia fotovoltaica usa semicondutores para gerar diretamente corrente elétrica em resposta aos fótons coletados da luz solar. Em uma célula solar, os fótons que transportam algumas porções do espectro da radiação solar fornecem energia suficiente para elevar o nível de energia de um elétron da banda de valência para a banda de condução. Os elétrons na banda de condução são livres para se mover dentro do material, o que significa que uma corrente pode fluir. A arquitetura das células solares permite que os elétrons extras fotogerados fluam de uma camada com elétrons extras para uma camada que perde elétrons quando expostos à luz. Existem muitas variações nesses princípios básicos, com diferentes dispositivos constituídos por diferentes materiais semicondutores (às vezes em combinação com um eletrólito) (MULVANEY, 2019).

Os módulos fotovoltaicos são conhecidos como painéis solares. Um módulo é composto por células solares interconectadas. A maioria dos módulos fotovoltaicos são placas planas com arranjos de células de silício ou filmes finos; placa plana significa que toda a superfície coleta luz. A energia fotovoltaica concentrada usa uma lente de vidro ou plástico para concentrar a luz em uma superfície semicondutora muito menor, mas cara. No lugar do silício, a maioria das células fotovoltaicas são tipicamente várias junções p-n semicondutoras e empilhadas feitas de arseneto de gálio, fosfeto de índio ou compostos semelhantes (MULVANEY, 2019).

As usinas fotovoltaicas mais comuns usam silício cristalino como material semicondutor nas células solares. Lingotes de silício cristalino, com diversos graus de pureza, que são cortados em laminas finas que, por sua vez, são transformadas em células solares através da dopagem do material com dadas concentrações de impurezas doadoras e aceitadoras controladas, formando uma junção p-n. Um lado apresenta impurezas doadoras, que fazem com que elétrons sejam os portadores de carga em maioria, e o outro lado apresenta impurezas

aceitadores que fazem com que lacunas (ou desprovemento de elétrons na banda de valência) sejam os portadores de carga majoritários. As células solares são geralmente colocadas entre uma folha de vidro e uma contracapa e encapsuladas em um polímero para proteger o módulo das intempéries.

Existem três tipos de painéis fotovoltaicos de silício cristalino, produzidos por várias centenas de fabricantes e com mais de 95% da participação no mercado fotovoltaico (MULVANEY, 2019). O silício é fundido em um cadinho transformando em um lingote, que posteriormente a partir de um único cristal (semente) é cristalizado pelo método de Czochralski. O processo requer a colocação de uma haste, contendo uma semente de silício puro e cristalino, no núcleo de um reator que contém silício fundido. À medida que o silício é resfriado em contato com a haste refrigerada, o silício líquido solidifica-se seguindo a orientação cristalina da semente. Outros processos que transformam o polissilício em silício cristalino incluem o processo de leito fluidizado, que utiliza o silano como entrada principal. O silano é usado em pequenas quantidades para formar células fotovoltaicas de silício cristalino. Mas as empresas que usam o silano como sua única fonte de silício usam volumes muito grandes de gás, responsáveis por mais mortes de trabalhadores do que qualquer outro produto químico nesta indústria.

Antes da fundição, pequenas quantidades de impurezas como o boro são adicionadas ao silício fundido, dopando-o para ser intrinsecamente uma camada *p*, capaz de aceitar um elétron recebido. Os lingotes puros de silício monocristalino, cilíndricos quando extraídos, são cortados em tijolos retangulares usando serras de fio diamantadas. Eles são então cortados em lâminas. Essas pastilhas de silício são limpas, texturizadas e dopadas com uma segunda impureza para formar a camada *n* que a torna um doador de elétrons. Com a camada *n* e a camada *p* agora integradas à célula solar, é aplicado um revestimento antirreflexo para maximizar a absorção de luz. Finalmente, as linhas de grade de contato e o barramento são adicionados à superfície da célula solar. Esses contatos colhem os elétrons adicionais, gerados pela chegada de luz, que se movem livremente na banda de condução, conduzindo-os para o circuito.

Existem vários outros processos usados para transformar o silício fundido em fotovoltaicos de silício multicristalino ou cristalino com fita. Enquanto o silício monocristalino é resfriado em um único cristal, o silício multicristalino (às vezes chamado silício policristalino) é fundido em cadinhos e, quando esfria, forma um lingote composto por regiões com orientação cristalina diferente daquela das regiões vizinhas. O silício cristalino da fita é produzido puxando as lâminas diretamente para fora do silício fundido, no lugar de cortar os lingotes em lâminas.

A energia fotovoltaica de filme fino usa camadas de semicondutores da ordem de centenas de nanômetros de espessura que são aplicadas a um substrato à medida que ele se move ao longo da linha de produção. O substrato geralmente é de vidro, mas essas camadas também podem ser aplicadas a materiais flexíveis, como plásticos e folhas de metal. Os filmes finos usam menos materiais semicondutores e menor consumo de energia, tornando-os, em princípio, mais baratos de fabricar. Eles também podem ser feitos mais rapidamente em um processo de fabricação contínuo, o que reduz ainda mais os custos. O tempo desde o início de um pedaço de vidro na linha de produção até o produto pronto para inspeção é da ordem de horas, em vez de semanas ou meses com tecnologias baseadas em silício. Tipos comuns de células de filmes finos atualmente em produção comercial incluem telureto de cádmio (CdTe), diseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si).

TABLE 1

Crystalline silicon	Thin films	Crystalline gallium arsenide
Monocrystalline	Cadmium telluride	Monocrystalline
Multicrystalline	Copper indium gallium diselenide	Concentrator
Thick silicon film	Amorphous silicon	Thin-film crystal
Thin-film crystal	Nano-silicon	
Silicon heterostructures (HIT)		
<b>Multi-junction cells</b>	<b>Emerging</b>	
Three junction (concentrator)	Dye-sensitized solar cells	
Three junction (non-concentrator)	Organic cells	
Two junction (concentrator)	Organic tandem cells	
Two junction (non-concentrator)	Inorganic cells	
Four junction (non-concentrator)	Quantum dots	
Multijunction silicon	Perovskites	

Tabela 1- Principais tecnologias usadas na indústria fotovoltaica (MULVANEY, 2019)

### 3. Gestão dos painéis fotovoltaicos ao final do ciclo de vida (LCA)

#### 3.1. Mercado global de painéis fotovoltaicos

Dados preliminares de 2018 do mercado global de painéis fotovoltaicos da IEA (*International Energy Agency*) (GAETAN MASSON, IEA PVPS TASK 1, LZUMI KAIZUKA, RTS CORPORATION, ALICE DETOLLENAERE AND JOHAN LINDAHL, BECQUEREL INSTITUTE., 2019) mostram um mercado global anual de PV em um nível semelhante ao de 2017. Pelo menos 99,8 GW de sistemas fotovoltaicos foram instalados e comissionados no mundo no ano passado. Este relatório é reproduzido parcialmente nos parágrafos seguintes.

Em 2017, em base semelhante a 2016, o mercado fotovoltaico bateu vários recordes e continuou sua expansão global, atingindo quase os 100 GW de reserva. Esperava-se um comportamento semelhante no mercado em 2018. No entanto, os resultados preliminares mostram uma estabilização do mercado global, uma vez que a instalação anual foi novamente de cerca de 100 GW em 2018.

Por alguns anos, o nível de desenvolvimento de mercado na China tem impulsionado o mercado global de PV em grande parte, enquanto o mercado

fotovoltaico chinês cresceu até 2017. Houve um declínio em 2018 com a instalação de cerca de 45,0 GW em comparação com 53,0 GW instalados em 2017. No entanto, esse declínio no mercado fotovoltaico chinês foi compensado por maiores volumes de instalação fora da China. Assim, o mercado fotovoltaico global mostrou uma situação estável, com 99,8 GW em comparação com 98,9 GW em 2017.

Atrás da China, a Índia ficou em segundo lugar, com cerca de 10,8 GW de instalações anuais em 2018, seguidas pelo mercado americano, que se contraiu levemente em 10,6 GW. A União Europeia segue com algum crescimento em 8,3 GW e o Japão com 6,5 GW, onde o mercado diminuiu ligeiramente.

Além da mudança de posição de alguns países, os cinco primeiros foram bastante semelhantes a 2017. Mais uma vez, o principal desenvolvimento do ano de 2018 foi o crescimento de vários outros países como: Austrália instalou 3,8 GW, México 2,7 GW e Coreia do Sul 2,0 GW. A Turquia seguiu com 1,6 GW em um mercado em declínio.

Olhando um pouco mais a fundo nos países da União Europeia, a Alemanha teve o melhor ano desde 2013, com cerca de 3,0 GW instalados e a Holanda entrou no primeiro lugar, com 1,3 GW instalado no ano.

A Ásia continua a dominar o mercado fotovoltaico global. Alguns dos principais mercados asiáticos já estabelecidos, como Taiwan ou Malásia, experimentaram um crescimento em 2018, enquanto o desenvolvimento em outros mercados, como Tailândia, Indonésia, Filipinas e Vietnã, foi intermitente ao longo dos anos. Os mercados asiáticos representaram um pouco menos de 70% do mercado fotovoltaico global, uma queda em 2018 em comparação com 2017.

Nas Américas, o declínio do mercado norte-americano (10,6 GW) foi compensado pelo México, que instalou cerca de 2,7 GW em 2018. O Brasil, que instalou 1,0 GW em 2017, viu seu mercado contrair-se a menos 400 MW. O Chile instalou 461 MW, um declínio comparado aos 657 MW em 2017. O Canadá



experimentou um novo declínio no mercado em 2018, pois o mercado caiu para 100 MW em 2018 em comparação com 249 MW em 2017. As Américas representavam cerca de 15% do mercado global PV em 2018.

No Oriente Médio, Israel instalou 432 MW adicionais, o maior desempenho em anos. Marrocos instalou 591 MW, enquanto planos estão sendo feitos para significativamente mais. Vários outros países da região experimentaram um rápido crescimento e centenas de MW de instalações, que serão conectadas principalmente em 2019. Nos Emirados Árabes Unidos e somente no Egito, podemos esperar que mais de 2 GW sejam conectados às usinas em 2019, que já foram parcialmente desenvolvidas até o final de 2018.

Na África, a África do Sul tornou-se o primeiro país africano a instalar perto de 1 GW de energia fotovoltaica em 2014, mas o mercado diminuiu significativamente desde então, pois apenas 60 MW foram instalados em 2018. Os projetos surgiram um pouco em todos os lugares, mas poucos países instalaram quantidades significativas em 2018. África e Oriente Médio representaram cerca de 6% das instalações fotovoltaicas globais em 2018.

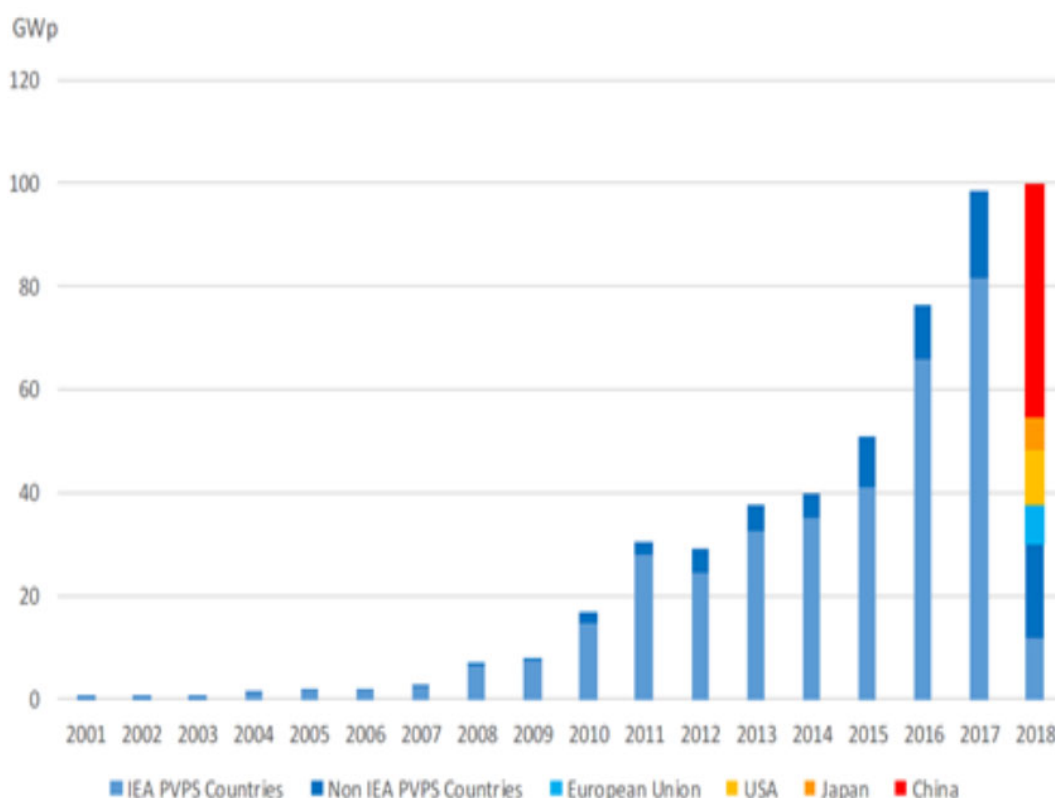


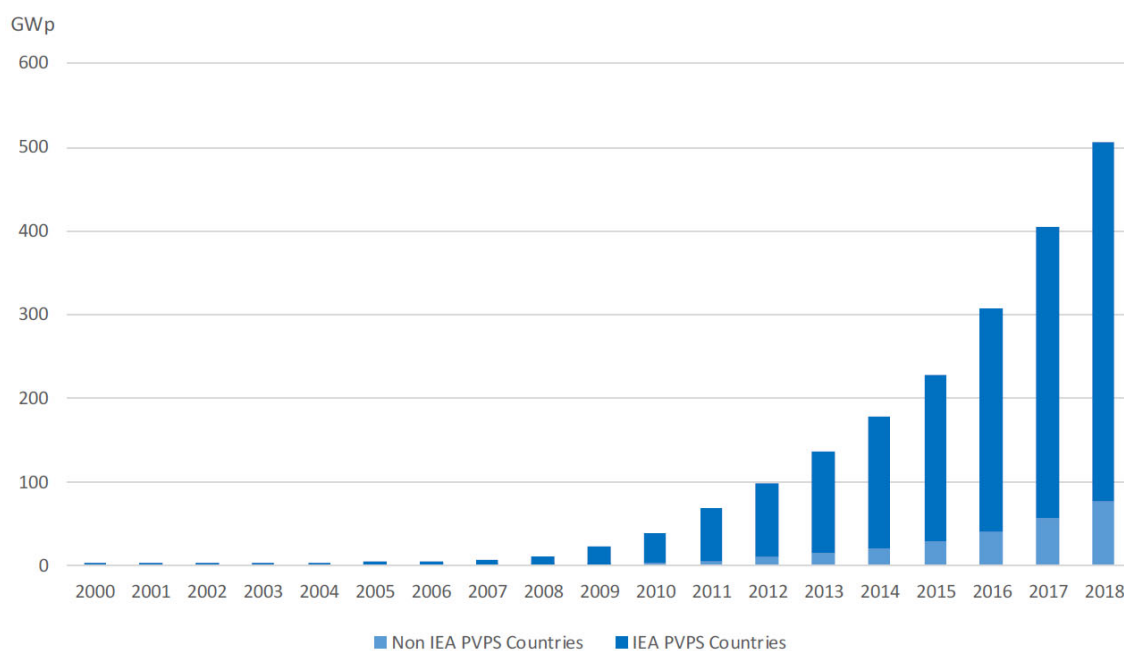
Figura 2- Evolução anual da instalação de painéis fotovoltaicos (GAETAN MASSON, IEA PVPS TASK 1, LZUMI KAIZUKA, RTS CORPORATION, ALICE DETOLLENAERE AND JOHAN LINDAHL, BECQUEREL LNSTITUTE., 2019)

### 3.2. Capacidade total instalada no mundo

A capacidade global total instalada (Figura 3) no final de 2018 era de pelo menos 500 GW, ou seja, metade de um TW. Em nível mundial, a China continua liderando com uma capacidade cumulativa de 176,1 GW, seguida pelo União Europeia (115,0 GW), EUA (62,2 GW), Japão (56,0 GW) e Índia (32,9 GW). Na União Europeia, a Alemanha lidera com 45,4 GW, seguida pela Itália (20, 1 GW) e pelo Reino Unido (13,0 GW). A Austrália atingiu 11,3 GW. Todos os outros países estão abaixo da marca de 10 GW.

Os países membros da IEA representaram 429,6 GW de instalações fotovoltaicas cumulativas juntas, principalmente conectadas à rede, no final de 2018. A IEA avalia 27 países com pelo menos 85% da capacidade fotovoltaica global.

Países não membros da IEA representam pelo menos 75,9 GW adicionais: Índia com pelo menos 32,9 GW, Reino Unido com 12,9 GW, Grécia com 2,7 GW, Grécia com 2,7 GW, Taiwan com 2,7 GW, Paquistão com 2,4 GW, República Tcheca com 2,2 GW, Brasil com 1,6 GW, Ucrânia com 1,6 GW, Romênia com 1,4 GW e Bulgária com 1,0 GW. Muitos outros países instalaram sistemas fotovoltaicos, mas nenhum atingiu a escala GW.



*Figura 3 - Capacidade global instalada até 2018 (GAETAN MASSON, IEA PVPS TASK 1, LZUMI KAIZUKA, RTS CORPORATION, ALICE DETOLLENAERE AND JOHAN LINDAHL, BECQUEREL INSTITUTE., 2019)*

### **3.3. Projeção da produção de resíduos devido ao uso de painéis fotovoltaicos**

Com o crescimento da utilização da energia fotovoltaica, conforme descrito no item 3.1 deste capítulo, conseqüentemente a produção de resíduos de painéis fotovoltaicos também aumentará. De forma a quantificar o crescimento na produção de resíduos de painéis fotovoltaicos no período até 2050 a IRENA criou uma metodologia, conforme descrito na Figura 4. Esta metodologia é uma abordagem em três etapas usada para quantificar a quantidade de resíduos ao uso de painéis fotovoltaicos ao longo do tempo.

A primeira etapa analisa as tendências e as futuras taxas globais de crescimento de energia solar fotovoltaica de 2010 a 2050, conforme descrito no item 3.1 deste capítulo. A segunda etapa tem como objetivo a quantificação dos volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos gerados durante as fases do ciclo de vida e finalmente a terceira etapa é a projeção da quantidade de resíduos gerados, que pode ser avaliado globalmente ou por países.



*Figura 4 Abordagem para quantificar os resíduos de painéis fotovoltaicos (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

Para contabilizar os fluxos de resíduos atuais e futuros dos painéis fotovoltaicos, as taxas globais de crescimento de energia fotovoltaica foram projetadas até 2050. Elas se baseiam nos resultados de trabalhos anteriores sobre previsões de energia fotovoltaica da IRENA e da IEA. Para as projeções para 2030, foi utilizado o REmap (Figura 5), as previsões da IRENA dobram a participação global de energias renováveis (IRENA, 2016a). Para 2030-2050, as projeções são baseadas no Roteiro de Tecnologia da IEA sobre Energia Solar Fotovoltaica (Figura 6) (IEA, 2014).

## Quadro 1 - Uma visão geral do REmap da IRENA - um roteiro global de energia renovável

O roteiro da IRENA mostra maneiras viáveis e econômicas de dobrar as energias renováveis de 18% para 36% no consumo final total de energia do mundo até 2030. Isso se baseia em uma análise aprofundada da transição energética em 40 economias, representando 80% do uso da energia global. Para cada tecnologia, incluindo a energia solar fotovoltaica, a implantação da capacidade de energia é calculada a partir do ano de referência de 2010 em incrementos de cinco anos até 2030. Isso leva em consideração as tecnologias existentes, seus custos e o prazo disponível.

A análise do REmap conclui que dobrar a participação de energias renováveis não é apenas viável, mas também mais barato do que não considerar esta participação, uma vez que fatores de saúde e ambientais são levados em consideração. A transição energética acelerada pode impulsionar o crescimento econômico, salvar milhões de vidas e, combinada com a eficiência energética, ajuda a limitar o aumento da temperatura global a 2° Celsius, em conformidade com o Acordo de Paris. Para atingir esse objetivo, no entanto, a implantação de energia renovável precisa acontecer seis vezes mais rápido. Para os tomadores de decisão nos setores público e privado, esse roteiro envia um alerta sobre as oportunidades disponíveis e os custos de não as aproveitar (IRENA, 2016a).

*Figura 5 - projeções para 2030, foi utilizado o REmap (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

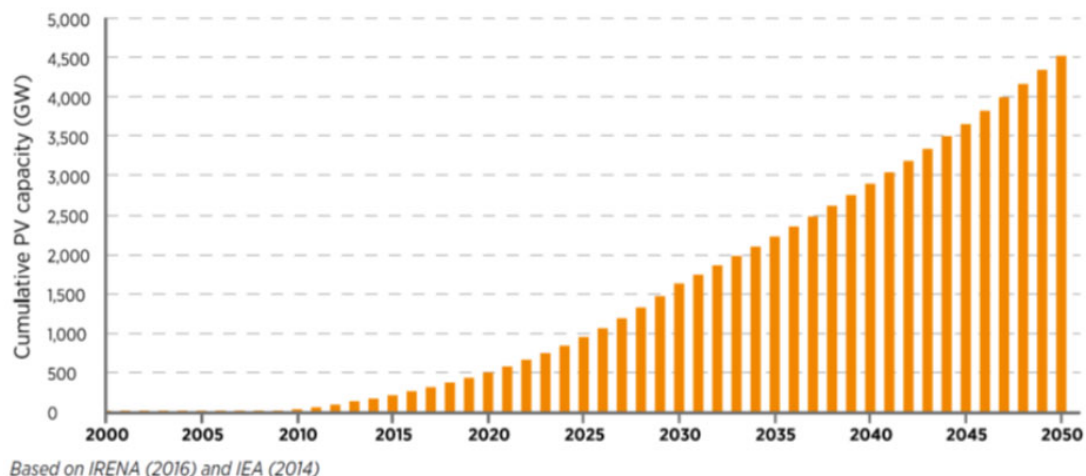
## Quadro 2 - Uma visão geral do roteiro de tecnologia fotovoltaica da IEA para 2050

Para obter as reduções necessárias nas emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia, a IEA desenvolveu uma série de roteiros de tecnologia global sob orientação internacional e em estreita consulta com a indústria. O objetivo geral é promover o desenvolvimento global e a adoção de tecnologias-chave para limitar o aumento da temperatura média global a 2° Celsius a longo prazo. Os roteiros não são previsões. Em vez disso, eles detalham as metas de melhoria tecnológica esperadas e as ações políticas necessárias para alcançar essa visão até 2050.

O PV Technology Roadmap é um dos 21 roteiros de tecnologia de baixo carbono e um dos nove para tecnologias de geração de eletricidade. Com base nas perspectivas de tecnologia energética da IEA (2014), este roteiro prevê que a contribuição do PV para a eletricidade global chegue a 16% até 2050. Esse é um aumento de 135 GW em 2013 para um máximo de 4.674 GW de capacidade fotovoltaica instalada em 2050. O roteiro pressupõe que os custos de eletricidade do PV em diferentes partes do mundo convergirão à medida que os mercados se desenvolvem. Isso implica uma redução de custo médio de 25% até 2020, 45% até 2030 e 65% até 2050, levando a US \$ 40-160 por megawatt-hora, assumindo um custo de capital de 8%. Para

*Figura 6 - Projeções são baseadas no Roteiro de Tecnologia da IEA (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

Conforme mostrado na Figura 7, a implantação global acumulada de PV acelerou após 2010 e espera-se um crescimento exponencial, atingindo 1.632 GW em 2030 e cerca de 4.512 GW em 2050.



*Figura 7- Capacidade PV acumulada global projetada (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

Para desenvolver estimativas anuais da capacidade fotovoltaica entre 2016 e 2030, foi feita uma interpolação entre as estimativas REmap da IRENA para 2015, 2020 e 2030. Para isso, foi calculada uma taxa média de crescimento anual entre cada período de cinco anos, totalizando 8,92%. Em alguns países selecionados, as taxas de crescimento individual podem ser ajustadas mais altas ou mais baixas devido às incertezas políticas e econômicas previstas. Para estender a projeção do modelo para 2050, foram assumidas projeções de crescimento mais conservadoras para 2030-2050, com taxa de crescimento anual de cerca de 2,5%. Essa extrapolação foi combinada com a previsão do roteiro de tecnologia fotovoltaica da IEA.

As projeções finais do crescimento global de PV para 2050 são mostradas na Tabela 2 e foram usadas para modelar fluxos de resíduos globais da segunda etapa.

Ano	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Capacidade instalada acumulada – PV (GW)	222	511	954	1.632	2.225	2.895	3.654	4.512

*Tabela 2 - Capacidade PV acumulada projetada, 2015-2050, com base em IRENA (2016) e IEA (2014) (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

Grande parte dos resíduos é normalmente gerada durante quatro fases primárias do ciclo de vida de qualquer painel fotovoltaico, a saber:

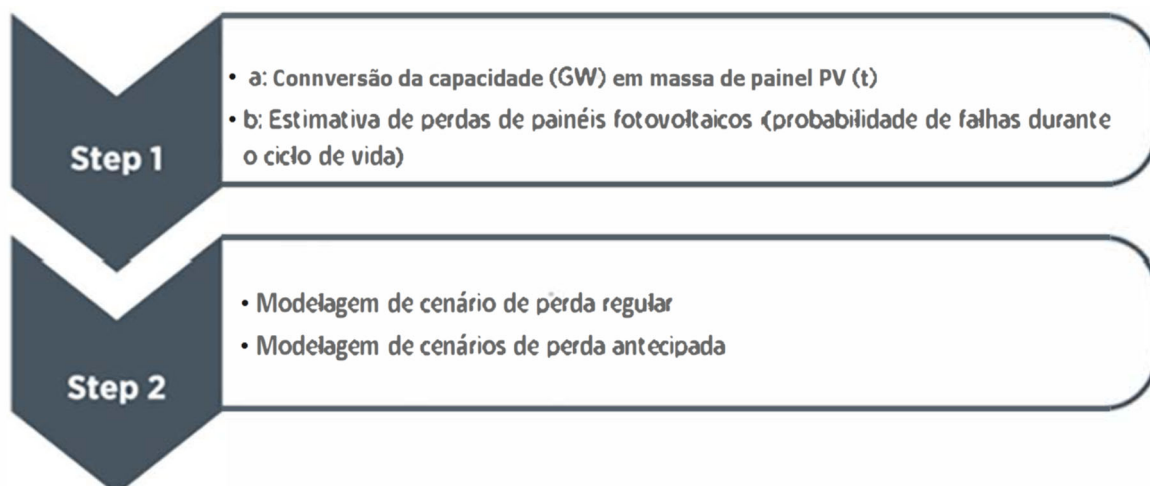
- 1) produção do painel;
- 2) transporte do painel;
- 3) instalação e uso do painel e
- 4) descarte no final da vida útil do painel.

O modelo de previsão de resíduos, criado pela IRENA, abrange todos os estágios do ciclo de vida, exceto a produção. Isso ocorre porque se supõe que os resíduos de produção sejam facilmente gerenciados, coletados e tratados pelos próprios fabricantes.

Os fluxos de resíduos do painel fotovoltaico podem ser quantificados de acordo com o modelo descrito na Figura 8. Os dois principais fatores de entrada são a conversão e a probabilidade de perdas durante o ciclo de vida do painel fotovoltaico (etapas 1a e 1b). Estes fatores são empregados para modelar dois cenários de fluxo de resíduos usando a função Weibull<sup>1</sup>, o cenário de perda regular e o de perda precoce (etapa 2).

---

<sup>1</sup> A distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua, assim métodos baseados nesta distribuição são ferramentas indispensáveis da engenharia de confiabilidade. Em geral, suas aplicações visam a determinação do tempo de vida médio e da taxa de falhas em função do tempo da população analisada. (Wikipedia, 2014)



*Figura 8 - Modo de desperdício do painel fotovoltaico em duas etapas (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

### **Etapa 1a: Conversão da capacidade em massa do painel fotovoltaico (de gigawatts para toneladas métricas)**

Para estimar os volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos, a capacidade fotovoltaica projetada (megawatts ou gigawatts-MW ou GW) foi convertida em massa (toneladas métricas-t). Uma razão média de massa de PV por capacidade unitária (t/MW) foi calculada pela média dos dados disponíveis sobre o peso de painéis e a potência nominal. Assim, foram utilizados dados típicos de painéis fornecidos pelos maiores produtores (Arco Solar, BP Solar, Kyocera, Shell Solar, Sharp, Siemens Solar, Solarex, Solarworld, Solarworld, Trina e Yingli). Para o estimar o volumes de resíduos de painéis fotovoltaicos já instalados, foi considerado média da potência e o peso nominais dos tipos de painéis fotovoltaicos padrão mais representativos e dos principais fabricantes em intervalos de cinco anos, através das as folhas de dados de painel da Arco, Siemens, BP, Solarex, Shell, Kyocera, Sharp, Solarworld e Trina.

O modelo também inclui um fator de correção para levar em conta que os painéis se tornam mais eficientes e mais leves com o tempo. Isso se deve à otimização do design de células e painéis, bem como à redução de peso de estruturas mais finas, camadas de vidro e wafer. O fator de correção é baseado em um ajuste exponencial pelo método dos mínimos quadrados da relação peso/potência para



painéis projetados e históricos.

A Figura 9 mostra como a relação peso/potência é continuamente reduzida ao longo do tempo devido a desenvolvimentos adicionais em tecnologias fotovoltaicas como economia de material e maior eficiência das células solares.

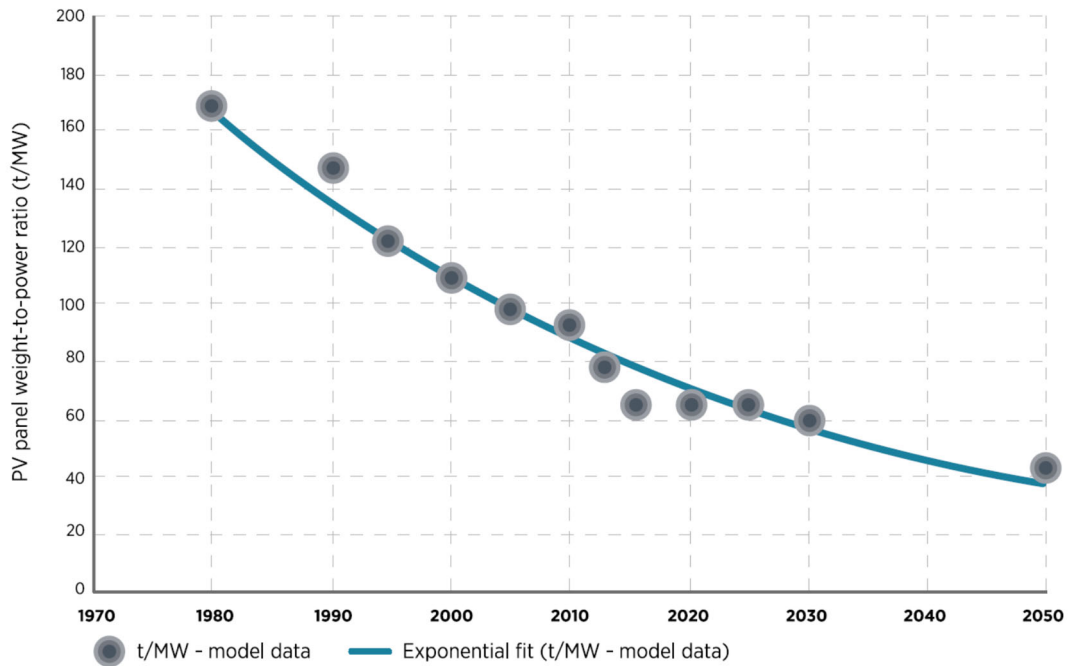


Figura 9 - Ajuste exponencial da curva de projeção da relação peso / potência do painel fotovoltaico (t/MW) (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)

### Etapa 1b: Probabilidade de perdas no painel fotovoltaico

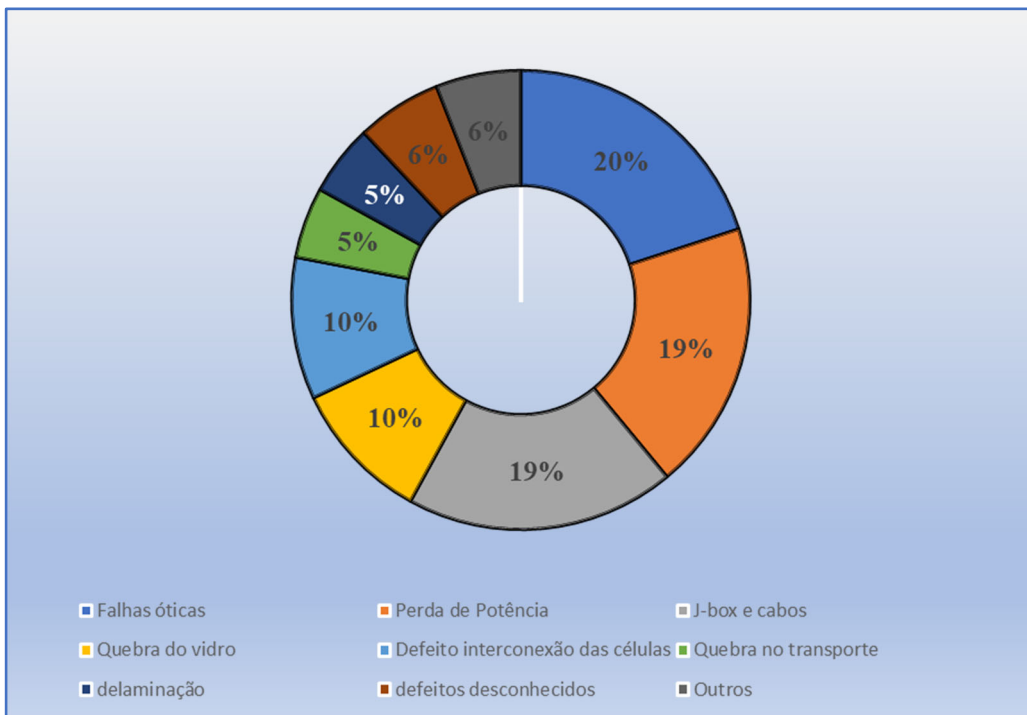
A origem de falhas potenciais nos painéis fotovoltaicos instalados, tanto em telhados como no solo foram analisadas independentemente da tecnologia fotovoltaica e sua aplicação, para estimar a probabilidade dos painéis fotovoltaicos se tornarem resíduos antes de atingir seus objetivos de fim de vida útil estimados. Foram identificadas três fases de falha principais dos painéis:

- Falhas precoces definidas como ocorrendo até quatro anos após a instalação (média de dois anos);
- Falhas de meia-idade definidas como ocorrendo cerca de cinco a onze anos

após a instalação, e

- Falhas de desgaste definidas como ocorrendo cerca de 12 anos após a instalação até o final da vida útil assumido aos 30 anos.

Dados empíricos sobre causas e frequência de falhas durante cada uma das fases definidas acima foram obtidos de diferentes fontes na literatura. Independente dessas fases, a Figura 10 fornece uma visão geral das principais causas de falha do painel fotovoltaico.



*Figura 10 - Taxas de falha de acordo com as reclamações dos clientes (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

As principais causas de falha precoce incluem degradação induzida pela luz (observada em 0,5% a 5% dos casos), planejamento inadequado, trabalho de montagem incompetente e construções de suporte inadequadas. Muitas falhas precoces foram relatadas nos sistemas elétricos, como caixas de junção, caixas de cordas, controladores de carga, cabos e aterramento.

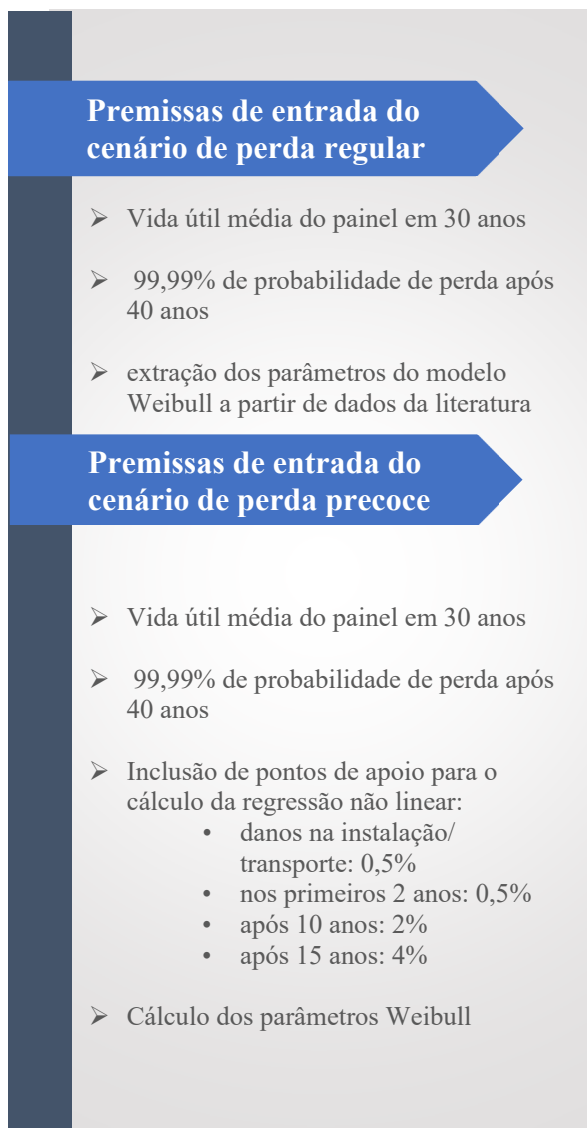
As causas de falhas na meia-idade estão relacionadas principalmente à degradação do revestimento antirreflexo do vidro, descoloração do acetato de

etileno vinil, delaminação e isolamento de células rachadas.

As causas de falhas frequentemente observadas em todas as fases nos primeiros 12 anos - após a exposição a ciclos de carga mecânica (por exemplo, cargas de vento e neve) e mudanças de temperatura - incluem degradação potencial induzida, falhas de contato na caixa de junção, quebra de vidro, estruturas soltas, célula falhas de interconexão e defeitos de diodo.

Na fase de desgaste, falhas como as relatadas na meia idade aumentam exponencialmente, além da corrosão severa de células e interconectores. Estudos anteriores com dados estatísticos sobre falhas no painel fotovoltaico observam adicionalmente que 40% dos painéis fotovoltaicos inspecionados sofriam de pelo menos uma célula com microfissuras. Esse defeito é mais comumente relatado em painéis mais novos fabricados após 2008 devido às células mais finas usadas na produção.

Essas falhas e as probabilidades de descobertas de perda, juntamente com os dados da etapa 1a (fatores de conversão), são usados para estimar os fluxos de resíduos do painel fotovoltaico (etapa 2). Com base nas etapas 1a e 1b, foram definidos dois cenários de resíduos fotovoltaicos conforme Figura 11 - o cenário de perda regular e o cenário de perda precoce.



*Figura 11- Cenários de resíduos fotovoltaicos para a etapa 2 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

## **Etapa 2: Cenários para estimativa anual do fluxo de resíduos (cenários de perda regular e perda precoce)**

Os cenários foram modelados usando a função Weibull, conforme indicado na fórmula abaixo. Assim probabilidade de perdas durante o ciclo de vida do painel fotovoltaico é determinada pelo fator de forma  $\alpha$  que difere para o cenário de perda regular e perda precoce.

$$F(t) = 1 - e^{-(t/T)^\alpha}$$

Onde:

F = Fluxo de resíduos no tempo;

t = tempo em anos;

T = Vida média do painel;

$\alpha$  = fator de forma, fator de forma, que controla o S típico da curva Weibull.

Os dois cenários assumem uma vida útil média do painel de 30 anos e uma probabilidade de perda de 99,99% após 40 anos. Uma vida útil do painel de 30 anos é uma suposição comum na análise de impacto ambiental da vida útil da PV (por exemplo, nas avaliações do ciclo de vida) e é recomendada pelo IEA-PVPS. O modelo pressupõe que, aos 40 anos, os painéis fotovoltaicos mais recentes sejam desmontados para reforma e modernização. Presume-se, portanto, que a durabilidade dos painéis fotovoltaicos esteja alinhada com as experiências médias de produtos de construção civil, como elementos de fachada ou telhas. Estes também tradicionalmente têm uma vida útil de 30 a 40 anos.

Nem perdas iniciais nem perdas precoces foram incluídas no cenário de perdas regulares. Os resultados de Kuitsche (2010) são usados diretamente, assumindo um fator de forma alfa neste cenário de 5.3759 conforme Tabela 3.

O fator de forma FF (do inglês fill factor) é uma grandeza que representa quanto a curva característica se aproxima da curva ideal e está relacionada com a corrente e a tensão, ou seja, do retângulo formado com vértices em  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ . O FF depende muito das características de construção da célula (dopagem, tipo de semicondutor, conexão, etc.) e quanto melhor a qualidade das células do módulo mais próxima a forma retangular será sua curva I-V. O fator de forma pode ser definido pela razão entre as áreas dos retângulos A e B. A definição gráfica do fator de forma (FF) é apresentada na Figura 12. Matematicamente, esse fator é dado pela equação abaixo:

$FF = (I_{mp} \times V_{mp}) / (I_{sc} \times V_{oc})$ , onde:

FF = Fator de Forma;

$I_{mp}$ ;  $V_{mp}$  = Corrente e tensão no ponto da curva onde ocorre a máxima transferência de potência da célula para carga;

$I_{sc}$  = corrente de curto circuito, medida do fluxo de portadores de corrente quando os terminais da célula estão no mesmo nível de tensão, ou seja, curto-circuitados;

$V_{oc}$  = tensão de circuito aberto, tensão formada entre os terminais da célula quando não há carga conectada.

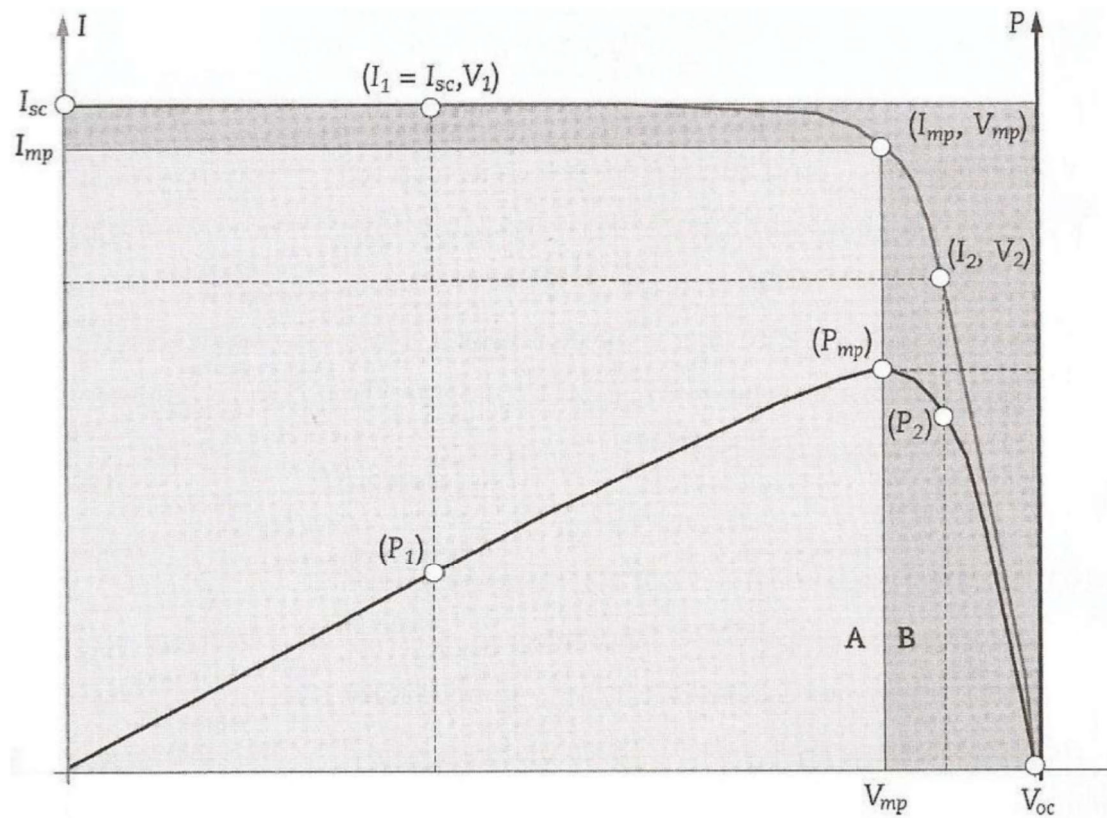


Figura 12 - Fator de Forma Definição (ZILLES, MACEDO, et al., 2012)

Weibull shape factors	Kumar & Sarkan (Kumar, 2013)	Kuitsche (2010)	Zimmermann (2013)	Marwede (2013)	This study
Lower	9.982	3.3		8.2	
Upper	14.41	8.7484		12.8	
Baseline		5.3759 (represents regular-loss scenario)	5.3759		2.4928 (represents early-loss scenario)

*Tabela 3 - Visão geral dos fatores de forma Weibull relatados na literatura para modelar a probabilidade de perda do painel fotovoltaico juntamente com os valores de base selecionados para uso no estudo (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

No cenário de perdas precoces, foram adotadas as seguintes premissas de perdas:

- Presume-se que 0,5% dos painéis fotovoltaicos (por capacidade fotovoltaica instalada em MW) atinjam o fim da vida útil devido a danos durante as fases de transporte e instalação;
- 0,5% dos painéis fotovoltaicos se tornarão resíduos dentro de dois anos devido a má instalação;
- 2% se tornarão resíduos após dez anos, e
- 4% serão desperdiçados após 15 anos devido a falhas técnicas.

O cenário de perda precoce também inclui falhas que exigem substituição do painel, como vidro quebrado, células ou fitas quebradas e backsheet rachado com defeitos de isolamento.

No cenário de perda precoce, o fator de forma foi calculado por uma análise de regressão entre os pontos através de informações da literatura. O fator de forma alfa resultante de 2,4928 para o cenário de perda precoce é inferior aos valores apresentados na literatura. Isso ocorre porque inclui defeitos iniciais que produzem maiores perdas nos primeiros 30 anos e menores perdas na vida adulta, caso um painel dure mais tempo.

Para cada cenário (perda regular e perda precoce), a probabilidade do valor de falha (alfa) é multiplicada de acordo com a função Weibull pelo peso dos painéis instalados em um determinado ano. Como um valor alfa maior é usado no cenário

de perda regular, a curva aumenta suavemente e cruza com a curva do cenário de perda antecipada no ponto de vida nominal de 30 anos. De acordo com a função Weibull e devido aos diferentes parâmetros alfa atribuídos, os cenários de perda regular e perda precoce têm o efeito oposto após 30 anos. Portanto, o cenário de perda regular indica uma maior probabilidade de perda a partir de 30 anos, conforme mostrado na Figura 13.

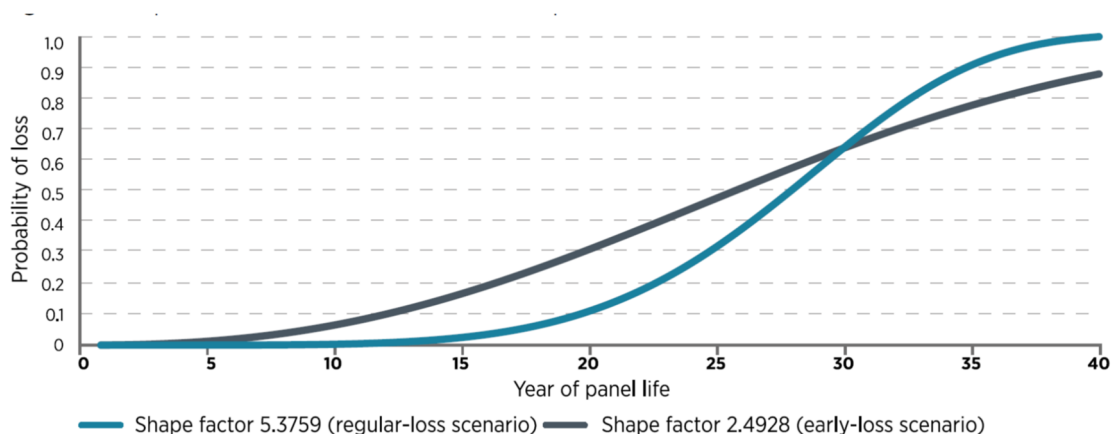


Figura 13 - Exemplo de curva de Weibull com dois fatores de forma diferentes (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)

Este modelo é o primeiro a quantificar os resíduos de painéis fotovoltaicos em escala global e em diferentes tecnologias fotovoltaicas. Isso significa que os cenários retratados aqui devem ser considerados estimativas, devido às suposições simples e à falta de dados estatísticos.

### 3.4. Perspectivas globais de resíduos de painéis fotovoltaicos

O total de lixo eletrônico no mundo deverá chegar à casa de 52 milhões de toneladas até 2021 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), 2019). Em comparação, os resíduos anuais projetados de painéis fotovoltaicos serão responsáveis por não mais que 850.000 t até o final de 2020, de acordo com o cenário de perda antecipada modelado pela IRENA, o que representará 1,6% do lixo eletrônico total, entretanto a quantidade global de resíduos de painéis fotovoltaicos aumentará significativamente nos próximos anos.



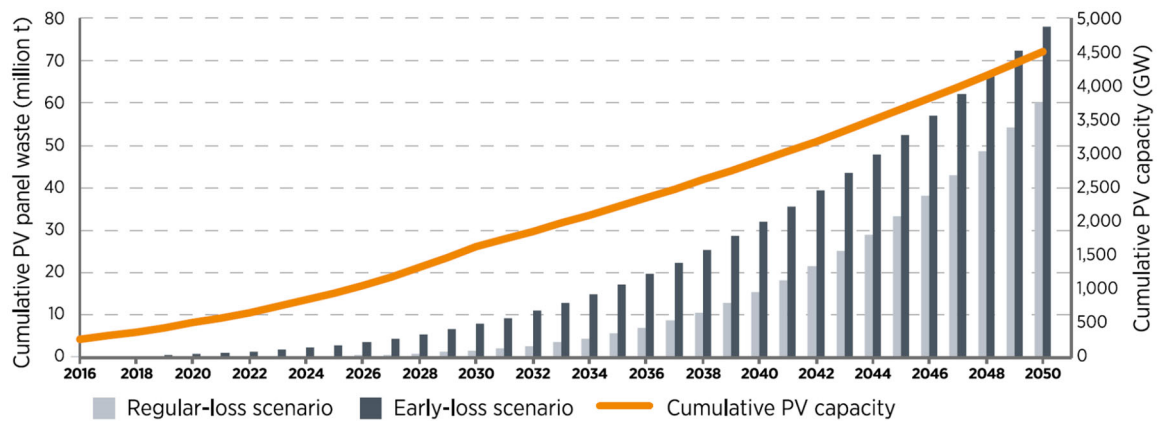


Figura 14 - resultados acumulados de resíduos de painéis fotovoltaicos até 2050 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)

O lixo anual proveniente de painéis fotovoltaicos até 2050 é mostrado na Figura 14, ilustrando a evolução do fim da vida útil do painel fotovoltaico e das novas instalações de painéis fotovoltaicos proporcionalmente as das duas estimativas. Essa relação começa baixa em 5% no final de 2020, por exemplo (ou seja, no cenário de perdas antecipadas, desperdício anual de 220.000 t em comparação com 5 milhões de t em novas instalações). No entanto, aumenta ao longo do tempo para 4% -14% em 2030 e 80% -89% em 2050. Nesse ponto, são previstos 5,5-6 milhões de t de resíduos de painéis fotovoltaicos (dependendo do cenário) em comparação com 7 milhões de t em novas instalações de painéis fotovoltaicos.

Uma característica dos parâmetros da curva Weibull para os dois cenários modelados é que o lixo estimado dos dois cenários se cruza. Há uma mudança entre cenário que prevê uma maior quantidade de resíduos em um determinado ano e o que prevê uma menor quantidade de resíduos. A interseção está projetada para ocorrer em 2046. Esse recurso de modelagem pode ser observado na Figura 15, que mostra o volume de resíduos de painéis fotovoltaicos no valor de mais de 80% do volume de novas instalações, como resultado do cenário de perda precoce em 2050. O valor comparável para o cenário de perda regular excede 88% no mesmo ano.

Figura 15 Painéis fotovoltaicos instalados anualmente e em fim de vida útil 2020-2050 (em% de resíduo vs. total instalado) por cenário de perda precoce (Gráfico 1) e cenário de perda regular (Gráfico 2)

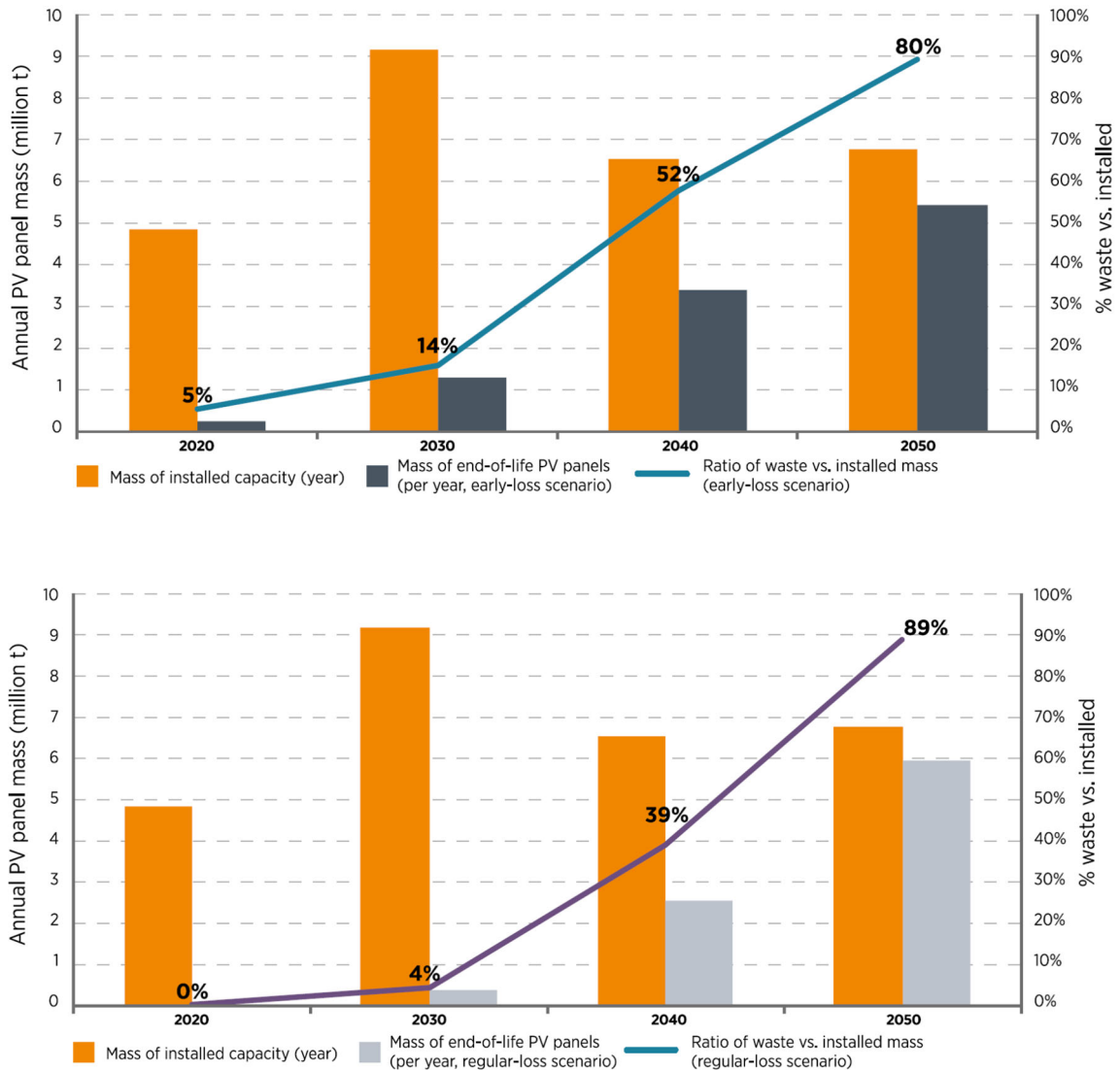


Figura 15 – Curva Massa x resíduo (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)

### 3.5. Projeções de resíduos por país

O estudo também estimou a quantidade de resíduos de painéis fotovoltaicos por países selecionados mostradas na Tabela 4 de 2016 até 2050. Os países foram escolhidos de acordo com a liderança regional no que diz respeito à implantação de PVs e crescimento esperado. As projeções foram modeladas usando os mesmos parâmetros de função Weibull que as estimativas globais da seção anterior. Os volumes projetados de resíduos de painéis fotovoltaicos em países

individuais são baseados em instalações anuais existentes e futuras e dependem dos dados de entrada disponíveis para cada país. A capacidade fotovoltaica instalada cumulativa histórica foi usada como referência em cada país, juntamente com projeções futuras para 2030 usando o REmap da IRENA e para o roteiro de tecnologia fotovoltaica da IEA para 2030 a 2050, com uma interpolação simples.

Year	2016		2020		2030		2040		2050	
Scenario (regular-loss/early-loss)	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss	regular loss	early loss
<b>Asia</b>										
China	5,000	15,000	8,000	100,000	200,000	1,500,000	2,800,000	7,000,000	13,500,000	19,900,000
Japan	7,000	35,000	15,000	100,000	200,000	1,000,000	1,800,000	3,500,000	6,500,000	7,600,000
India	1,000	2,500	2,000	15,000	50,000	325,000	620,000	2,300,000	4,400,000	7,500,000
Republic of Korea	600	3,000	1,500	10,000	25,000	150,000	300,000	820,000	1,500,000	2,300,000
Indonesia	5	10	45	100	5,000	15,000	30,000	325,000	600,000	1,700,000
Malaysia	20	100	100	650	2,000	15,000	30,000	100,000	190,000	300,000
<b>Europe</b>										
Germany	3,500	70,000	20,000	200,000	400,000	1,000,000	2,200,000	2,600,000	4,300,000	4,300,000
Italy	850	20,000	5,000	80,000	140,000	500,000	1,000,000	1,200,000	2,100,000	2,200,000
France	650	6,000	1,500	25,000	45,000	200,000	400,000	800,000	1,500,000	1,800,000
United Kingdom	250	2,500	650	15,000	30,000	200,000	350,000	600,000	1,000,000	1,500,000
Turkey	30	70	100	350	1,500	11,000	20,000	100,000	200,000	400,000
Ukraine	40	450	150	2,500	5,000	25,000	50,000	100,000	210,000	300,000
Denmark	80	400	100	2,000	4,000	22,000	40,000	70,000	130,000	125,000
Russian Federation	65	65	100	350	1,000	12,000	20,000	70,000	150,000	200,000
<b>North America</b>										
United States of America	6,500	24,000	13,000	85,000	170,000	1,000,000	1,700,000	4,000,000	7,500,000	10,000,000
Mexico	350	800	850	1,500	6,500	30,000	55,000	340,000	630,000	1,500,000
Canada	350	1,600	700	7,000	13,000	80,000	150,000	300,000	650,000	800,000
<b>Middle East</b>										
United Arab Emirates	0	10	50	100	3,000	9,000	20,000	205,000	350,000	1,000,000
Saudi Arabia	200	250	300	1,000	3,500	40,000	70,000	220,000	450,000	600,000
<b>Africa</b>										
South Africa	350	550	450	3,500	8,500	80,000	150,000	400,000	750,000	1,000,000
Nigeria	150	200	250	650	2,500	30,000	50,000	200,000	400,000	550,000
Morocco	0	25	10	100	600	2,000	4,000	32,000	50,000	165,000
<b>Oceania</b>										
Australia	900	4,500	2,000	17,000	30,000	145,000	300,000	450,000	900,000	950,000
<b>Latin America and Caribbean</b>										
Brazil	10	10	40	100	2,500	8,500	18,000	160,000	300,000	750,000
Chile	150	200	250	1,500	4,000	40,000	70,000	200,000	400,000	500,000
Ecuador	10	15	15	100	250	3,000	5,000	13,000	25,000	35,000
<b>Total World</b>	<b>43,500</b>	<b>250,000</b>	<b>100,000</b>	<b>850,000</b>	<b>1,700,000</b>	<b>8,000,000</b>	<b>15,000,000</b>	<b>32,000,000</b>	<b>60,000,000</b>	<b>78,000,000</b>
<b>Sum of Leading Countries</b>	<b>28,060</b>	<b>187,255</b>	<b>72,160</b>	<b>668,500</b>	<b>1,352,850</b>	<b>6,442,500</b>	<b>12,252,000</b>	<b>26,105,000</b>	<b>48,685,000</b>	<b>67,975,000</b>
<b>Rest of the World</b>	<b>15,440</b>	<b>62,745</b>	<b>27,840</b>	<b>181,500</b>	<b>347,150</b>	<b>1,557,500</b>	<b>2,748,000</b>	<b>5,895,000</b>	<b>11,315,000</b>	<b>10,025,000</b>

*Tabela 4 - Resultados modelados dos volumes acumulados estimados de resíduos de painéis fotovoltaicos em fim de vida por país (t) (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

#### 4. Impactos Ambientais

Fthenakis faz uma abordagem importante dos impactos ambientais produzidos durante o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos (FTHENAKIS, 2018). Questões ambientais importantes surgem durante a vida útil de um sistema fotovoltaico, que começa com a extração e purificação de matérias-primas; prossegue com a fabricação, instalação e muitos anos de operação; e termina com a reciclagem ou descarte de resíduos. Assim é importante avaliar todo o ciclo de vida dos painéis para conhecer os impactos sócio ambientais causados pelo uso intensivo de energia fotovoltaica.

Para quantificar os impactos ambientais causados pelos fluxos de material e energia em cada um dos estágios do "ciclo de vida" de painel fotovoltaico é necessário definir todos os estágios do ciclo, desde a extração da matéria-prima até o final da vida útil. O ciclo normalmente começa na mineração de materiais do solo e continua com o processamento e a purificação dos materiais até a fabricação dos compostos e produtos químicos utilizados no processamento e fabricação, transporte, instalação, uso, manutenção e eventual desativação e descarte e/ou reciclagem. Na medida em que os materiais são reutilizados ou reciclados no final de sua primeira vida em novos produtos, a estrutura é estendida de "berço a berço". Este ciclo de vida para os painéis fotovoltaicos é mostrado na Figura 16.

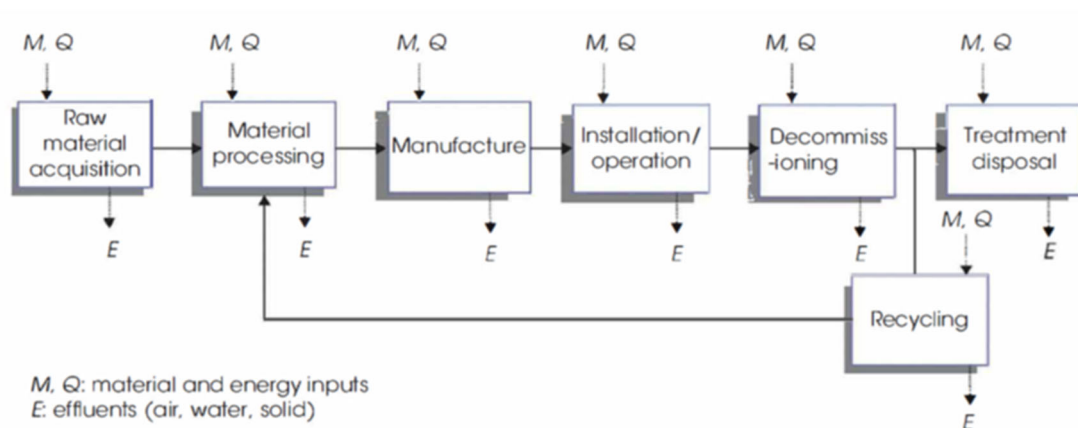


Figura 16 - As etapas do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos (FTHENAKIS, 2018)

A fabricação de módulos fotovoltaicos requer o uso muita energia e materiais - água, metais, plásticos, vidro e outras peças e componentes - que produzem impactos sociais e ambientais. Mesmo que esses impactos ainda sejam menores, a expansão da energia fotovoltaica para os níveis de terawatt trará impactados significativamente nas emissões de gases de efeito estufa exigirá novas considerações sobre materiais e usos do solo. Quanto mais cedo os impactos puderem ser identificados, avaliados e planejados, maior a probabilidade de se mitigar as consequências.

Parte dos painéis fotovoltaicos que utilizam filmes finos contêm compostos de cádmio, que são metais pesados que apresentam riscos ambientais, de saúde e de segurança com altos níveis de exposição. Sabe-se que a exposição aguda a formas elementares e solúveis de compostos elementares de cádmio causa doença renal, enfraquecimento ósseo, defeitos congênitos, infertilidade, insuficiência renal, inflamação pulmonar grave e fibrose pulmonar. O cádmio é um conhecido agente cancerígeno (causador de câncer), mutagênico (causador de mutação) e genotoxina (prejudicial à informação genética). O caso epidemiológico mais citado de exposição ao cádmio é do Japão em meados do século XX, onde a doença de itai-itai causou graves danos ósseos a jusante de uma mina de zinco cuja poluição por cádmio havia penetrado no arroz consumido pela comunidade (MULVANEY, 2019). Por muito tempo usado em pigmentos e como anticorrosivo, o cádmio não é mais usado em muitos produtos, especialmente naqueles que eventualmente poderiam liberá-lo no ambiente, como tintas. Seu uso em filmes finos fotovoltaicos é uma das poucas áreas em que a demanda por compostos de cádmio está crescendo.

O cádmio de metal azulado e seus compostos, que podem variar de preto a amarelo, é um dos quatro metais pesados proibidos em todos os produtos vendidos na União Europeia pela Diretiva Restrição de Substâncias Perigosas (RoHS) - um regulamento em toda a Europa baseado no princípio de precaução que poderia bloquear a venda de energia fotovoltaica que os contém. Desde agosto de 2005, as empresas que vendem uma ampla gama de produtos elétricos nos mercados europeus devem estar em conformidade com a RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) e a Diretiva WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment*). O WEEE foi

criado para reduzir a quantidade de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos destinados ao descarte final, enquanto o RoHS visa reduzir o número de substâncias perigosas encontradas em equipamentos elétricos e eletrônicos. As duas diretrizes representam um foco expandido, da redução dos impactos ambientais dos processos de produção à redução dos impactos ambientais da produção e do descarte de produtos manufaturados.

Os maiores riscos à saúde humana dos compostos de cádmio no ciclo de vida dos produtos fotovoltaicos Cd-Te ocorrem nos locais das atividades de mineração, fundição e gerenciamento de fim de vida. O Cd-Te pode ser um material mais seguro de manusear do que outros compostos de cádmio, mas é fabricado pelo homem; é um composto que não ocorre nos minérios da crosta terrestre. Independentemente da segurança do Cd-Te, a exposição a compostos de cádmio pode ocorrer mais profundamente na cadeia de suprimentos de minas e fundições, que em alguns casos foram associadas a grupos de câncer (MULVANEY, 2019). O cádmio é produzido a partir de resíduos de zinco e de fundição de chumbo e zinco. O cádmio e o telúrio são geralmente encontrados em menores quantidades nos minérios de outros metais, como zinco, chumbo e cobre.

Em resumo, a fabricação de módulos fotovoltaicos utiliza alguns materiais perigosos que podem apresentar riscos à saúde e segurança, se não forem tomadas as devidas precauções. As condições de rotina nas instalações de fabricação e o descarte final não devem representar nenhuma ameaça à saúde e ao meio ambiente. Riscos surgem principalmente pela toxicidade e explosividade de gases específicos. Liberações acidentais de gases e vapores perigosos podem ser impedidos, com treinamento de funcionários, procedimentos de segurança e um descarte criterioso.

## **5. Tecnologias de reciclagem**

A reciclagem de módulos gastos pode não ser vista como um problema imediato no desenvolvimento de energia solar. No entanto, o rápido crescimento da energia solar resultará em problemas de disposição de resíduos em um futuro próximo, pois o fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos geraria uma quantidade significativa de resíduos (cerca de 100 toneladas/ W de módulos fotovoltaicos desativados)

(FTHENAKIS, 2018). O descarte de pequenas quantidades de módulos fotovoltaicos em aterros sanitários não deve causar riscos ambientais quando os módulos passam nos testes de lixiviação EP A, projetados para simular as condições de liberação. No entanto, é amplamente reconhecido que em grandes escalas de implantação e descomissionamento, a reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida seria necessária para evitar riscos de poluição ambiental e recuperar materiais valiosos. Na Europa, o setor fotovoltaico adotou uma abordagem proativa, atualmente exigida, a conformidade com os regulamentos de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE). A Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos da Alemanha (ElectroG), que exige a coleta e a reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), foi estendida ao PV em meados de 2015 e deve se tornar um padrão global. Os Estados Unidos carecem de uma política nacional e da infraestrutura necessária para exigir a reciclagem de PV. Os regulamentos ambientais podem determinar o custo e a complexidade de lidar com módulos fotovoltaicos em fim de vida. Caso sejam caracterizados como "perigosos", os requisitos especiais para manuseio, descarte, manutenção de registros e relatórios aumentarão o custo para descarte dos módulos.

Atualmente, existem soluções técnicas bem testadas (processos de separação e recuperação de material) para produtos c-Si (baseados em wafer) e PV CdTe, mas não para outras tecnologias. O primeiro passo na reciclagem dos dois tipos de módulos é separar as caixas de junção e, para o c-Si, as estruturas de alumínio. As etapas subsequentes tratam da separação do vidro e do módulo elétrico. Para os módulos c-Si, o tratamento térmico queima os laminados para facilitar os processos de separação (chamados de delaminação do módulo). A maneira mais comum de conseguir isso é através da pirólise, aquecendo o módulo a 450-600°C para decompor o encapsulante orgânico. Após a delaminação, os componentes são separados manualmente, o vidro é enviado para uma instalação de reciclagem de vidro e as pastilhas de silício são processadas ainda mais, polindo e reutilizando a pastilha ou reciclando o silício em uma nova pastilha (Figura 17).

Nas etapas de separação, fio de cobre, armação de alumínio, vidro, silício e resíduos são separados e enviados para os recicladores. O plástico é queimado durante o

tratamento térmico e os resíduos vão para um aterro.

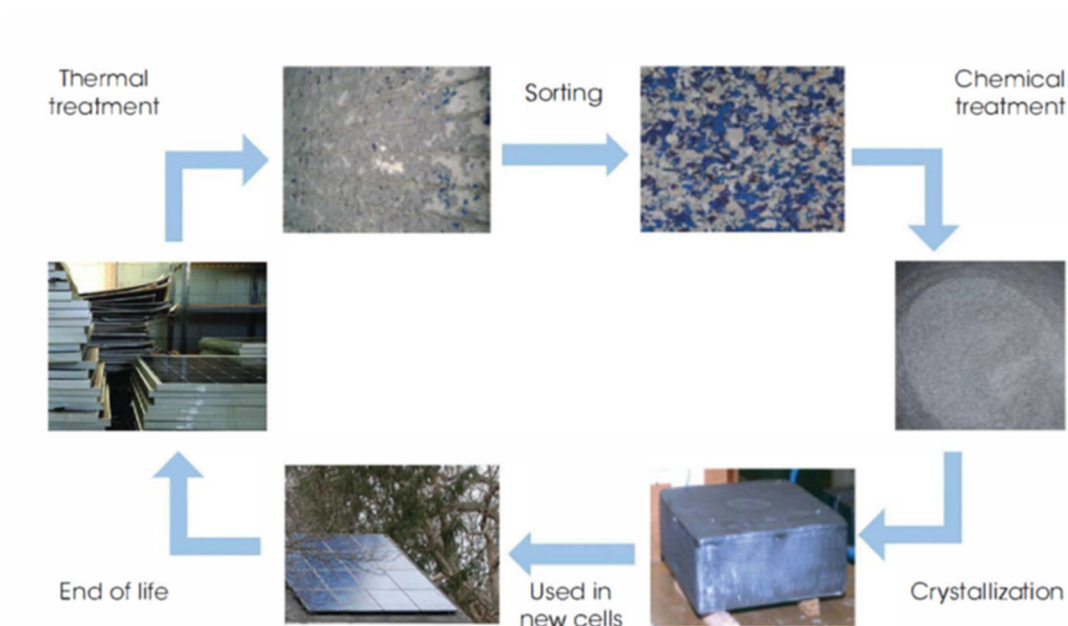


Figura 17 - Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (FTHENAKIS, 2018)

Primeiro, os módulos deverão ser transportados para entrar no processo de reciclagem. Em seguida, os “string boxes” são desmontados manualmente. O tratamento térmico, queima os laminados para facilitar os processos de separação. Das etapas de separação, fio de cobre, estrutura de alumínio, vidro e resíduos são separados. Durante o próximo passo, as células solares são tratadas quimicamente. As camadas de superfície e difusão são removidas posteriormente por etapas de limpeza. As células e a quebra do wafer são limpas através de uma decapagem com ácido. Os “String Boxes” deverão ser processados por uma empresa de tratamento de resíduos e/ou sucata eletrônico. O plástico é queimado após o tratamento térmico. Os resíduos vão para um aterro sanitário. O alumínio pode ser reutilizado, enquanto vidro, cobre e silício podem ser vendidos para empresas de reciclagem. O processo térmico pode ser aprimorado em relação a sua produtividade, tempo de ciclo e rendimento. O rendimento das células recuperadas depende em grande parte do tipo, design e estado dos módulos a serem processados.

A reciclagem dos painéis CdTe é um pouco mais avançada. Baseia-se em uma tecnologia hidrometalúrgica de baixo custo e ecológica, desenvolvida pela First



Solar e pela BNL. Essa tecnologia envolve travar os módulos, remover os filmes finos do substrato e recuperar os materiais de filmes finos da solução conforme descrito no próximo parágrafo (Figura 18).

Os módulos são cortados por uma trituradora e quebrados em pedaços pequenos com um moinho de martelos. As peças são então expostas à lixiviação usando uma mistura diluída de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, que extrai os metais (principalmente cobre) e os elementos semicondutores (telúrio e cádmio). Uma coluna de troca iônica é então usada para separar o cobre e o cádmio da solução, resultando em uma solução rica em telúrio de onde o Te é então extraído por precipitação seletiva. O cádmio é enxaguado da coluna e recuperado eletroliticamente.

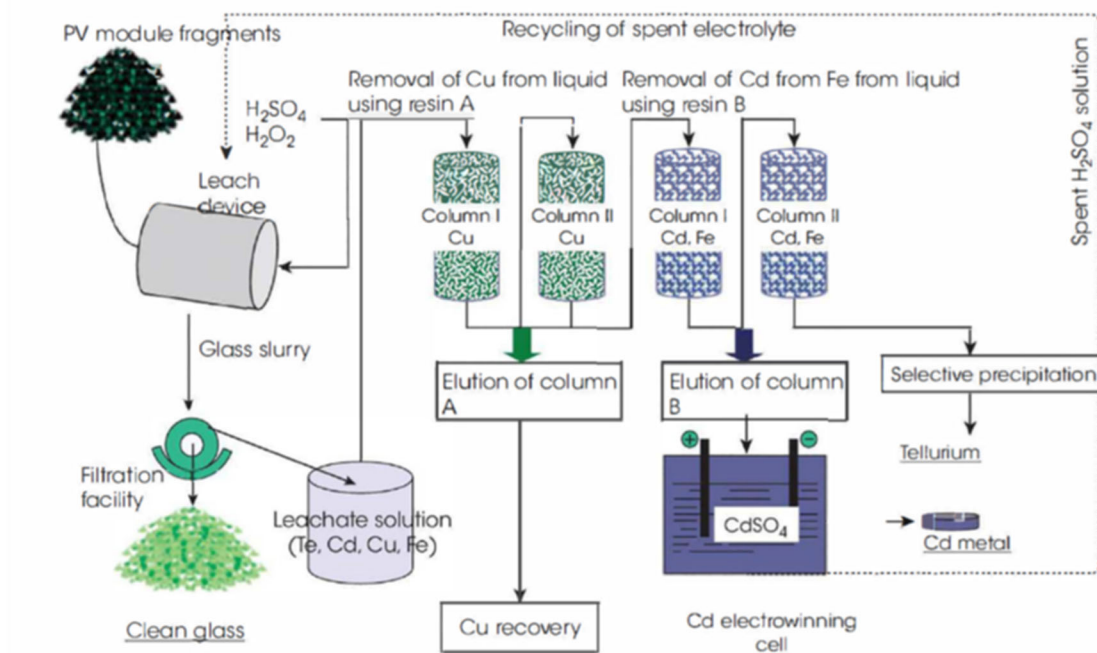


Figura 18 - Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe (FTHENAKIS, 2018)

Fthenakis considera que, a disponibilidade de recursos, a acessibilidade e os menores impactos ambientais possíveis são três pilares principais do crescimento sustentável da energia fotovoltaica para níveis que permitirão a transição da eletricidade atual baseada em combustíveis fósseis para uma renovável (FTHENAKIS, 2018). A

reciclagem de módulos fotovoltaicos usados aborda todas essas três dimensões da sustentabilidade (Figura 19) (FTHENAKIS, 2018).

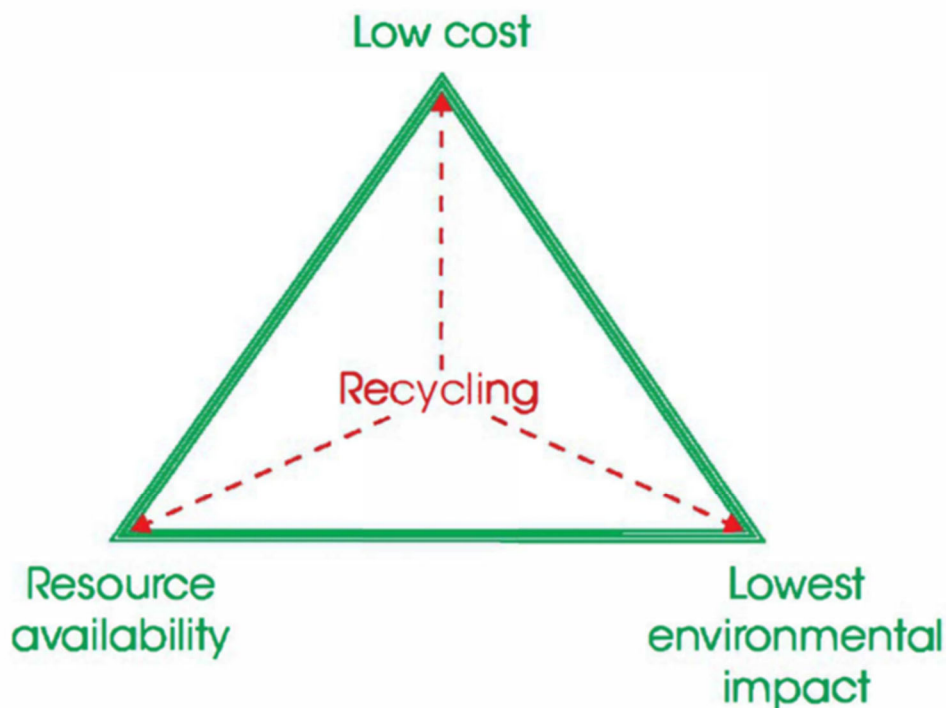


Figura 19 - A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV (Concept Vasilis Fthenakis) (FTHENAKIS, 2018)

A reciclagem ajuda a evitar a escassez de tais materiais necessários para a produção e reduz o custo dos módulos fotovoltaicos. Atualmente, os programas de reciclagem são estabelecidos para apenas dois tipos de módulos fotovoltaicos: CdTe e c-Si. O primeiro recupera o vidro e os elementos semicondutores para reutilização na síntese do CdTe, enquanto o segundo recupera apenas a estrutura de alumínio e o vidro. A reciclagem fotovoltaica de tecnologias maduras (por exemplo, c-Si e CdTe) é técnica e economicamente viável. Contabilizando a produção secundária da reciclagem e as melhorias contínuas na eficiência do módulo e na utilização de materiais, vários estudos mostram que a disponibilidade de telúrio nas próximas décadas é suficiente para uma produção cumulativa no nível de TW de potência. Na Europa, a indústria fotovoltaica criou o PV CYCLE, um programa voluntário para reciclar módulos fotovoltaicos ([www.pveyele.org](http://www.pveyele.org)). Esse tipo de abordagem de toda a indústria para

gerenciar economicamente a reciclagem em larga escala deve se tornar um componente essencial dos roteiros de redução de custos. Além disso, é necessária uma avaliação tecno econômica comparativa das tecnologias de reciclagem de PV existentes e propostas; isso ajudará a comercialização de reciclagem econômica e a criação de uma economia de reciclagem de PV.

### **5.1. Criação de valor com a reciclagem dos painéis fotovoltaicos**

Existem oportunidades para criação de valor em cada segmento da cadeia de valor dos painéis fotovoltaicos, incluindo o estágio de final do ciclo de vida. Em uma visão geral, as oportunidades de criação de valor estão relacionadas a reduções no uso de material, opções para reparo e reutilização e, a reciclagem e tratamento de resíduos de painéis fotovoltaicos. Assim, a criação de valor em diferentes segmentos da cadeia de valor solar foi estudada nas publicações da IRENA “Os benefícios socioeconômicos da energia solar e eólica” (2014) e “Benefícios de energia renovável: alavancando indústrias locais” (2016 no futuro). Além destes a IRENA publicou o resultado de um projeto P&D, em junho de 2016 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016), apresentando valores que poderão ser criados até 2050 com a reciclagem dos painéis fotovoltaicos.

Neste estudo, a IRENA afirma que é possível criar um valor importante extraindo matéria-prima secundária dos painéis fotovoltaicos no final do ciclo de vida dos painéis e disponibilizando-as novamente no mercado. Com uma vida útil média de 30 anos, os painéis fotovoltaicos acumularão um grande estoque de matérias-primas incorporadas em produtos que não estarão disponíveis para recuperação por um período considerável. Por exemplo, um grande fluxo de prata da reciclagem de painéis não é esperado até 2025.

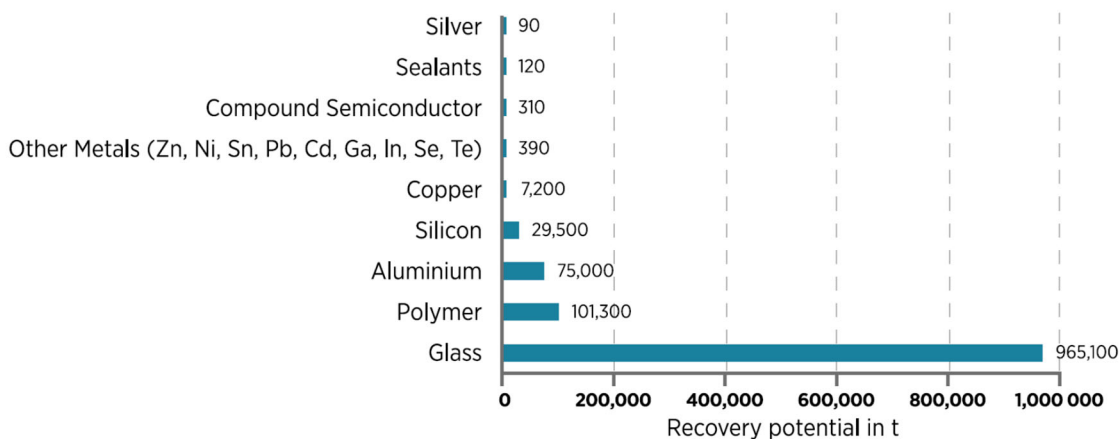
As seguintes premissas foram adotadas para a estimativa de reaproveitamento de matérias primas:

- As matérias-primas podem ser tratadas e recicladas a uma taxa de 65% a 70% em massa. Essas taxas de recuperação já são alcançáveis hoje e estão alinhadas com o único regulamento existente para reciclagem de painéis fotovoltaicos até o

momento, a Diretiva WEEE da UE. Elas também são uma taxa combinada e assumem uma taxa de coleta de 85% do fluxo total de resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil, bem como tecnologias de tratamento e reciclagem de alto valor disponíveis para recuperar a maioria das frações de material. Isso exclui perdas do processamento mecânico (por exemplo, triturador e pós de moagem) e recuperação térmica de frações de polímeros não recicláveis (por exemplo, plástico duro).

- As estimativas são baseadas nas taxas esperadas de tecnologia de células fotovoltaicas (por exemplo, c-Si, CdTE, CIGS) e composição de resíduos relacionada multiplicada pelo volume acumulado de 1,7 milhão de toneladas para 2030 no cenário de perda regular.
- As estimativas de valor monetário relatadas são baseadas nos preços de mercado de abril de 2016 (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016) e podem variar no futuro devido a (1) possíveis flutuações de preços no mercado de matérias-primas e (2) mudanças na composição de matérias-primas dos painéis fotovoltaicos.

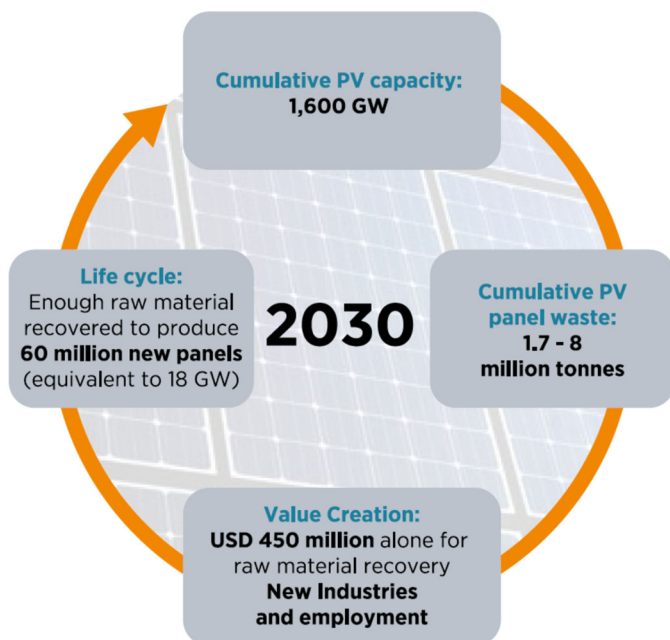
Os resultados de possíveis matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030 são exibidos na Figura 20



*Figura 20 - Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

O potencial valor total do material recuperado por meio de tratamento e reciclagem de painéis fotovoltaicos chega a US \$ 450 milhões até 2030, Figura 21 Isso equivale ao valor

atual da matéria-prima necessária para produzir 60 milhões de novos painéis ou 18 GW. Em comparação, 180 milhões de novos painéis foram produzidos em 2015.

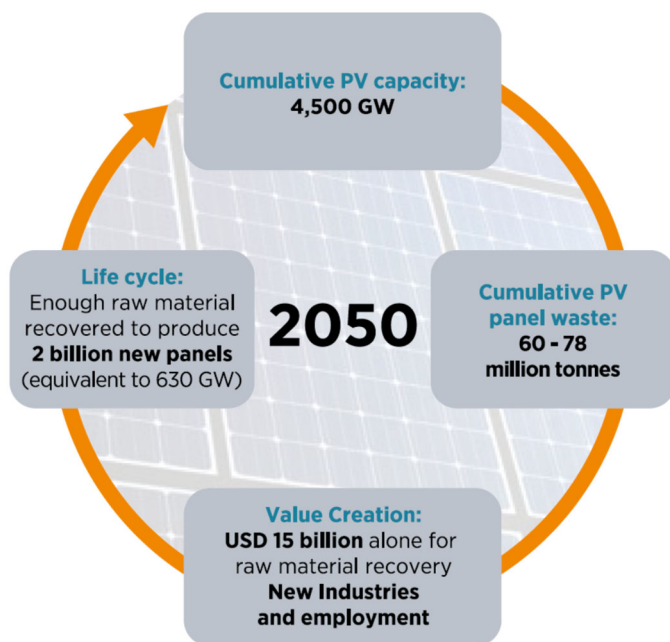


*Figura 21 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

Mais de 80% do peso dos painéis fabricados com qualquer tecnologia fotovoltaica é referente ao vidro; portanto, a maior massa de material de reciclagem vem do vidro, estimado em aproximadamente 960.000 toneladas até 2030. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias eficientes de reciclagem de vidro para painéis fotovoltaicos é essencial. Com um preço médio de mercado de material secundário para vidro de US \$ 30-50/t, dependendo da qualidade da recuperação (*Eurostat Statistics, 2014*), o potencial de valor de recuperação excede US\$28 milhões. Estima-se que quantidades significativas de alumínio (aproximadamente 75.000 toneladas) e cobre (aproximadamente 7.000 toneladas) sejam relançadas no mercado de materiais secundários através do tratamento de painéis fotovoltaicos. Ambos podem ser facilmente reciclados usando a infraestrutura disponível hoje. Seu valor combinado atual é de até US\$140 milhões (*Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016*). Se comparados com a produção mundial em 2015, 58.300 toneladas (US Geological Survey, 2016), esses materiais oferecem um importante

suprimento adicional de matéria-prima até 2030. O uso de material para células de silício foi reduzido significativamente nos últimos dez anos, de cerca de 16 gramas/Wp para menos de 4 gramas/Wp devido ao aumento da eficiência. As tecnologias cristalinas de silício continuam a dominar o mercado fotovoltaico. Isso significa que até 30.000 toneladas de silício, um material valioso, podem potencialmente ser recuperadas até 2030, assumindo baixas perdas de rendimento. Isso é equivalente à quantidade de silício necessária para produzir mais de 45 milhões de novos painéis ou cerca de US \$ 380 milhões (usando os preços atuais de polissilício a US\$ 20/kg e uma taxa de recuperação de valor de 70%).

Aplicando o mesmo cenário de perdas regulares até 2050, o potencial de valor das matérias-primas desbloqueadas deverá subir para mais de US \$ 15 bilhões, Figura 22. Isso equivale à matéria-prima necessária para produzir dois bilhões de novos painéis - 630 GW.



*Figura 22 - Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050 (IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN HEATH, 2016)*

A tonelagem de matéria-prima recuperada pode ser comercializada e enviada como matérias-primas primárias a partir de recursos extrativos tradicionais. Os volumes injetados de volta à economia podem servir para a produção de novos painéis fotovoltaicos ou outros produtos, aumentando assim a segurança do suprimento futuro de

fotovoltaicos ou outros produtos dependentes das matérias-primas utilizadas nos painéis fotovoltaicos. Como resultado, o rápido crescimento do volume de resíduos de painéis ao longo do tempo estimulará o mercado de matérias-primas secundárias originárias de PV em fim de vida.

## 6. O Cenário no Brasil

A EPE – Empresa de Pesquisa Energética apresenta uma visão, em seu Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), uma expansão de referência com incertezas inerentes a todo processo de planejamento, um crescimento da geração fotovoltaica no Brasil.

Os números consideram um a taxa de crescimento do País, bem como o aumento da demanda por energia. A energia fotovoltaica terá um crescimento de aproximadamente 12.000 Mw até 2029, conforme Figura 23.

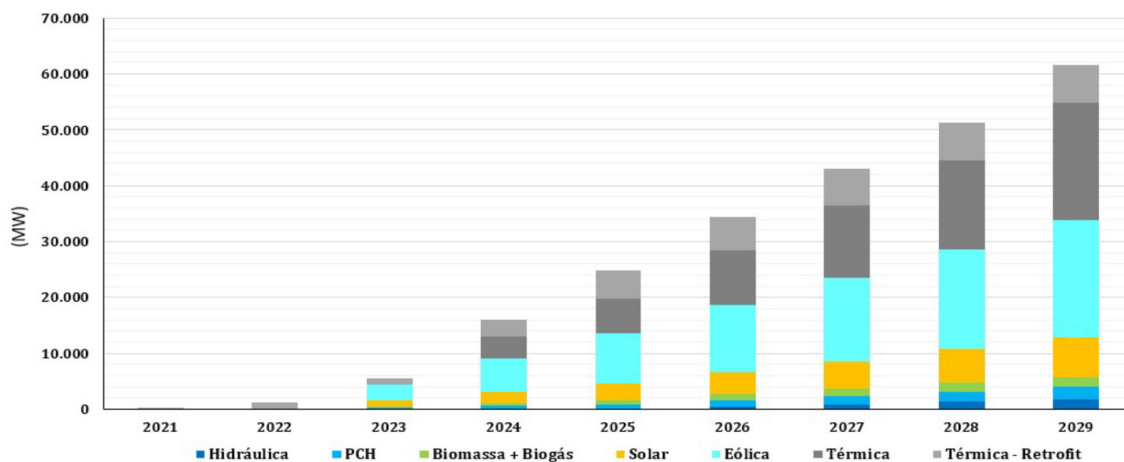


Figura 23 - Expansão Indicativa de Referência – PDE 2029 (ENERGETICA, 2019)

Assim utilizando a mesma relação resíduos/Mw e US\$/Mw, empregada pela IRENA nas projeções para 2050, a fonte fotovoltaica poderá produzir, no Brasil, aproximadamente 184.000 toneladas de resíduos, o que seria um mercado de aproximadamente US\$ 40 milhões.

O consumo de energia durante a reciclagem também deverá ser considerado no cálculo do custo final do processo.

## 7. Conclusão

As projeções apresentadas neste trabalho comprovam que o mundo passa por uma transição em sua matriz energética e que cada vez mais as energias renováveis vão substituir outras fontes. Hoje, as tecnologias fotovoltaicas estão competindo com as principais tecnologias de produção de energia. A transição para quantidades crescentes de energia solar pode ter impactos mínimos se bem planejada e implantada com as melhores práticas ambientais. Todas as tecnologias de energia vêm com externalidades sociais e ambientais que podem produzir, manter ou reproduzir desigualdades ambientais.

O trabalho contribui na análise dos potenciais processos para a reciclagem dos painéis fotovoltaicos e sua possibilidade de criação de valor agregado ao uso sustentável das matérias primas necessárias em sua produção.

Diante dos problemas expostos, a reciclagem se faz necessária. Experiência anterior, particularmente em mercados da UE relativamente maduros, identificou inúmeras lições aprendidas e melhores práticas das quais os novos entrantes do mercado podem utilizar.

Como a energia fotovoltaica é a protagonista desta transição, o gerenciamento de painéis fotovoltaicos durante o ciclo de vida útil possui o potencial de desenvolver novos caminhos para o crescimento da indústria e oferece oportunidades de emprego para diferentes partes interessadas. Este será um elemento essencial na transição do mundo para um futuro de energia sustentável.



## 8. Referências Bibliográficas

A.JAGER-WALDAU. Relatório Status PV 2016 PT. **EUR 28159**.

ABSOLAR. **ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**, 2019. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 24/09/2019 Setembro 2019.

CAISO CALIFORNIA INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR. California ISO solar production soars to the new record. **California Independent System Operator**, Julho 2016.

CYNTHIA LATUNUSSA, F. A. G. A. B. L. M. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic**. European Commission - Politecnico di Torino. Torino. 2016.

ENERGETICA, E. -E. D. P. **Plano de Expansão Decenal 2019**. [S.l.]. 2019.  
ENKHARDT, S. A AIE espera 115 GW das novas instalações fotovoltaicas este ano. **PV Magazine - Newsletter**, 25 setembro 2019.

FTHENAKIS, V. M. E. L. P. A. **Electricity from sunlight: photovoltaic systems integration and sustainability - Second Edition**. [S.l.]: Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2018.

GAETAN MASSON, IEA PVPS TASK 1, LZUMI KAIZUKA, RTS CORPORATION, ALICE DETOLLENAERE AND JOHAN LINDAHL, BECQUEREL INSTITUTE. **PVPS - 2019 A Snapshot of Global Markets**. IEA - International Energy Agency. [S.l.]. 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables Information: Overview**. International Energy Agency. Paris. 2019.

IEA PVPS. **IEA PVPS Task 1 -Strategy PV Analysis and Outreach**. IEA. [S.l.]. 2019. (ISBN 978-3-906042-83-1).

IRENA: STEPHANIE WECKEND, IEA-PVPS: ANDREAS WADE, GARVIN

HEATH. **End-of-life Management: Solar Photovoltaic Panels**. IRENA - International Renewable Energy Agency. [S.l.]. 2016. (ISBN 978-92-95111-99-8 (PDF, IRENA)).

KEIICHI KOMOTO, J.-S. L. **End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies**. IEA - International Energy Agency. Paris. 2018. (ISBN 978-3-906042-61-9).

KOMOTO, K. & O. S. & S. T. & U. H. **Recycling of PV Modules and its Environmental Impacts**. Mizuho Information & Research Institute, Inc. Tokyo. 2018. (2590-2593. 10.1109/PVSC.2018.8547691.).

MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTANER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics - Fundamentals and Applications**. Second. ed. Oxford: Academic Press of Elsevier, 2011.

MULVANEY, D. **Solar Power: Innovation, Sustainability, and Environmental Justice**. Okland: University of California Press, 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **A New Circular Vision for Electronics Time for a Global Reboot**. World Economic Forum. Geneva - Suíça. 2019.

WIKIPEDIA. **Wikipedia**, 2014. ISSN Q16883127. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Shape\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Shape_factor)>. Acesso em: 22 Outubro 2019.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2012.