

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

**GABRIELLA STASIAK ZAMARCHI**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS  
APLICADAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SOB A ÓTICA DA  
ECONOMIA CIRCULAR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2020**

**GABRIELLA STASIAK ZAMARCHI**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS  
APLICADAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SOB A ÓTICA DA  
ECONOMIA CIRCULAR**

**Exploratory analysis of the sustainability of technologies applied to the  
production of photovoltaic panels from the circular economy's perspective**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Avancini  
Schenatto

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Msc. Denise Rauber

**PATO BRANCO  
2020**



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS APLICADAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR**, da aluna **GABRIELLA STASIAK ZAMARCHI** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **262** de 2020.

Fizeram parte da banca os professores:

**Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto**

**Prof<sup>a</sup>. Msc. Denise Rauber**

**Prof. Msc. César Augusto Portolann**

**Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares**

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

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Clarice e Clair, por me ensinarem a busca pelo pensamento crítico, por me ajudarem entender quais são meus reais valores, pelo afeto, pelo amor, pelo aconselhamento, e por todo o apoio imensurável. Agradeço ao meu irmão, Paulo, pela cumplicidade, pela amizade e pela sintonia.

Agradeço a todas as minhas amigas e amigos, que me fazem crescer, que me incentivam a ir além, que me ensinam a ver o mundo por outros olhos, e por compartilharem comigo a busca pela compreensão da realidade.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos de faculdade, principalmente pelos momentos difíceis que passamos juntos, pois nestes aprendemos a ser mais fortes.

Agradeço aos meus orientadores Fernando Schenatto e Denise Rauber, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, e também à UTFPR e a todos os meus professores, que me trouxeram aprendizados técnicos e humanos que certamente levarei para a vida.

## EPIGRAFE

*“Sincerely believe that you might not know the best possible path and recognize that your ability do deal well with ‘not knowing’ is more important than whatever it is you do know.” (DALIO, Ray, 2020)*

“Acredite sinceramente que você talvez possa não saber o melhor caminho possível, e reconheça que sua habilidade de lidar bem com o ‘não saber’ é mais importante do que qualquer coisa que você sabe.” (DALIO, Ray, 2020)

## RESUMO

STASIAK ZAMARCHI, Gabriella. **Análise Exploratória da Sustentabilidade de Tecnologias Aplicadas na Produção de Painéis Fotovoltaicos Sob a Ótica da Economia Circular**. 62f. Monografia – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

A geração solar por meio de painéis fotovoltaicos é uma solução sustentável que cresce no mundo todo. Porém, para se tornar uma alternativa realmente sustentável, a produção dos painéis precisa ser repensada para que a extração de matérias-primas seja atenuada e o descarte dos resíduos de fim de vida seja rediscutido. Esta pesquisa apresenta uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) que busca explorar soluções sustentáveis apresentadas, no recorte de literatura estabelecido, para a fabricação de painéis, reincorporando resíduos de células solares na cadeia de produção, ou seja, utilizando-se de uma ótica de Economia Circular (EC). Com o levantamento de pesquisas acadêmicas e documentos regulatórios, analisa-se as três gerações de painéis fotovoltaicos e suas arquiteturas, explorando tecnologias inovadoras, como as *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs), *Organic Photovoltaics* (OPV) e células solares de perovskita, além das já consolidadas células solares de silício cristalino (c-Si). A pesquisa investiga o tratamento de fim de vida de painéis fotovoltaicos e procedimentos de reciclagem. A partir da análise de um portfólio selecionado de 15 artigos, o trabalho explora a tecnologia de produção *Roll-to-Roll* (R2R) usada para a fabricação de células fotovoltaicas de filme fino da terceira geração. Aborda-se também a iniciativa do projeto CABRISS (*implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver*), que promove ações para a implementação da EC para recuperação de resíduos de fotovoltaicas na Europa. Mostrou-se que a recuperação de resíduos de fim de vida para a primeira e segunda geração pode se mostrar vantajosa, enquanto, para a terceira geração, ainda não existem sistemas estabelecidos de recuperação de resíduos. A pesquisa aponta para novas pesquisas de políticas de gestão de resíduos e para a escalabilidade de novas tecnologias, além da redução dos custos de produção.

**Palavras-chave:** Fotovoltaicas, Economia Circular, Sustentabilidade, 3GPV.

## ABSTRACT

STASIAK ZAMARCHI, Gabriella. **Exploratory Analysis of the Sustainability of Technologies Applied to the Production of Photovoltaic Panels from the Circular Economy's Perspective**. 62f. Monograph – Course of Electrical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

Solar energy generation through photovoltaic panels is a sustainable solution that grows worldwide. However, to become a truly sustainable alternative, the production of the panels needs to be re-thought so that the extraction of raw materials is mitigated and the disposal of end-of-life waste is re-discussed. This research presents a Systematic Literature Review (SLR) that seeks to explore sustainable solutions presented, in the interval of the established literature, for the manufacture of panels, reincorporating waste from solar cells in the production chain, that is, using a Circular Economy (CE) perspective. With the survey of academic research and regulatory documents, the three generations of photovoltaic panels and their architectures are analyzed, exploring innovative technologies, such as Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), Organic Photovoltaics (OPV) and perovskite solar cells, in addition to the already consolidated crystalline silicon (c-Si) solar cells. The research investigates the end-of-life treatment of photovoltaic panels and recycling procedures. Based on the analysis of a selected portfolio of 15 articles, the work explores the Roll-to-Roll (R2R) production technology used for the manufacture of third generation thin film photovoltaic cells. The CABRISS (implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver) project initiative is also addressed, which promotes actions for the implementation of CE for the recovery of photovoltaic waste in Europe. It has been shown that the recovery of end-of-life waste for the first and second generation can prove to be advantageous, while, for the third generation, there are still no established systems for waste recovery. The research points to new researches on waste management policies and the scalability of new technologies, in addition to reducing production costs.

**Keywords:** Photovoltaics, Circular Economy, Sustainability, 3GPV.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de energia elétrica no mundo por fonte. ....	14
Figura 2 - Fluxograma da RSL para o trabalho. ....	22
Figura 3 - Classificação dos artigos por quantidade de citações. ....	27
Figura 4 - Relevância dos periódicos no portfólio final. ....	28
Figura 5 - Fluxo de recursos ao longo de uma cadeia de valor em uma Economia Circular. ....	32
Figura 6 - Capacidade instalada de geração de energia por fonte no Cenário de Política Declaradas, 2000-2040. ....	33
Figura 7 - Estimativa cumulativa do volume global de resíduos de fim de vida de painéis fotovoltaicos. ....	34
Figura 8 - Resultados após normalização da produção de células solares de c-Si sem (barras vermelhas) e com (barras verdes) o uso de silício reciclado. ....	35
Figura 9 - Composição de um típico painel fotovoltaico de c-Si. ....	39
Figura 10 - Princípio de produção R2R de uma célula planar p-i-n de perovskita. ....	44
Figura 11 - Dye-sensitized solar cell (DSSC – Grätzel Cell). ....	45
Figura 12 - Estruturas químicas de representações de moléculas como doadores de elétrons e aceitadores de elétrons. ....	46
Figura 13 - Arquitetura de uma célula solar Organic Photovoltaic (OPV). ....	47
Figura 14 - Diagramas esquemáticos de células solares de perovskita nas estruturas (a) n-i-p mesoscópica, (b) n-i-p planar, (c) p-i-n planar e (d) p-i-n mesoscópica. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de artigos obtidos nas bases de pesquisa.....	25
Tabela 2 - Resumo da filtragem do portfólio.....	26
Tabela 3 - Ocorrência de palavras-chave nos artigos do portfólio final.....	29
Tabela 4 - Participação no mercado e eficiência das três gerações de painéis fotovoltaicos. ....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

a-Si	Silício amorfo
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Seleneto de cobre índio-gálio
CIS	Seleneto de cobre índio
CPV	<i>Concentrated Photovoltaics</i>
CRM	<i>Critical Raw Material</i>
c-Si	Silício Cristalino
DSSCs	<i>Dye-sensitized solar cells</i>
EC	Economia Circular
EoL	<i>End-of-Life</i>
EPBT	<i>Energy payback time</i>
EVA	Acetato de vinil etileno
GW	Gigawatt
HCPV	<i>High Concentrated Photovoltaics</i>
HTL	<i>Hole transport layer</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITO	<i>Indium-Tin-Oxide</i>
mm	Milímetros
MWh	Megawatt-hora
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OPVs	<i>Organic Photovoltaics</i>
PCE	<i>Power Conversion Efficiency</i>
PPV	<i>Printable Photovoltaic</i>
PSCs	<i>Perovskite Solar Cells</i>
PV	<i>Photovoltaics</i>
R2R	<i>Roll-to-Roll</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
TCO	<i>Transparent conducting oxide</i>
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
UE	União Europeia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	18
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	19
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	19
2.2	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	20
2.2.1	Revisão Sistemática da Literatura	20
2.2.2	Análise Bibliométrica	24
2.2.3	Análise de Conteúdo	24
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	25
3.1	RESULTADOS DA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO	25
3.2	RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	27
3.2.1	Número de Citações	27
3.2.2	Relevância dos Periódicos	28
3.2.3	Ocorrência de Palavras-chave	29
3.2.4	Distribuição de Artigos pelo Ano de Publicação	29
3.3	DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO	30
3.3.1	O Modelo de Economia Circular nas Fotovoltaicas	30
3.3.1.1	Princípios da Economia Circular	30
3.3.1.2	O Cenário da Economia Circular nas Fotovoltaicas	32
3.3.2	As Três Gerações de Painéis Fotovoltaicos	36
3.3.2.1	Primeira Geração de Fotovoltaicas: Painéis Fotovoltaicos de Silício	38
3.3.2.2	Segunda Geração de Fotovoltaicas	41

3.3.2.3 Terceira Geração de Fotovoltaicas (3GPV).....	42
3.3.3 <i>Roll-to-Roll</i> (R2R) .....	43
3.3.4 <i>Dye-Sensitized Solar Cells</i> (DSSCs).....	44
3.3.5 <i>Organic Photovoltaics</i> (OPVs).....	45
3.3.6 <i>Perovskite Solar Cells</i> (PSCs).....	47
3.3.7 Painéis Solares Integrados à Construção (BIPV).....	49
3.3.8 A Diretiva Europeia <i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i> (WEEE) e o Projeto H2020 CABRISS.....	50
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A – PORTFÓLIO FINAL</b> .....	<b>60</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONTEÚDO</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico constante e o crescente poder de consumo de países emergentes, a demanda por energia aumenta, e, com isso, os impactos ambientais relacionados às matrizes energéticas convencionais.

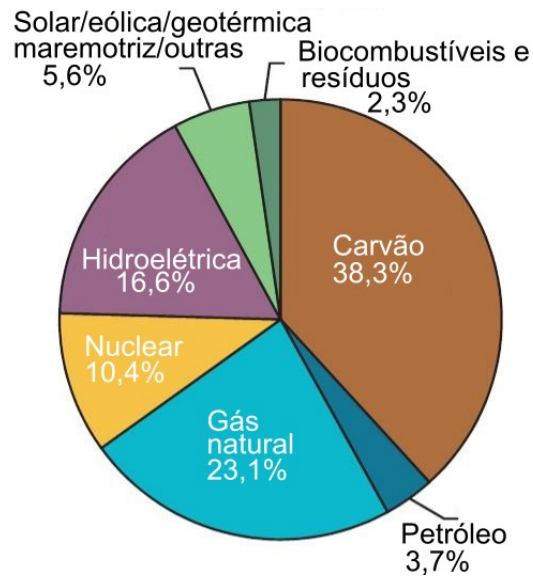
De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), desde 1974 a geração de energia elétrica cresceu ano após ano, com exceção de 2008, devido à crise mundial que impactou seus países membros. A variação neste período foi de 6298 TWh para 25082 TWh, uma média de crescimento de 3,3% ao ano. Em 2016, o consumo de energia elétrica no mundo chegou a 20863 TWh, provindos de geração com fontes ainda predominantemente não-renováveis, correspondendo a 75,5% do total (IEA, 2018).

Atualmente, o consumo de energia cresce 2,6% no mundo, e, com isso, a emissão de gases de efeito estufa vinda da geração de energia elétrica aumenta em média 2,1% ao ano (PAYET *et al.*, 2019).

A IEA é ligada à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), que "promove políticas que melhoram o bem-estar econômico e social em todo o mundo" (OCDE, 2019), com 36 países membros, entre países desenvolvidos e emergentes, dos quais o Brasil faz parte. Desses países, 30 fazem parte da IEA, incluindo o Brasil. Países membros da OCDE, entre 2016 e 2017, diminuíram a geração de energia elétrica por combustíveis fósseis pelo quinto ano seguido, mostrando aumento significativo em fontes renováveis – em energia eólica, +15,1%, e em solar, +21,9% (IEA, 2018).

Apesar do aumento da geração de energia por fontes renováveis (0,55% ao ano), a energia elétrica vinda da queima de combustíveis fósseis aumentou 2,1% ao ano – apenas em 2016, foram gerados 16 milhões de GWh de energia provinda de tais fontes (PAYET *et al.*, 2019).

A divisão da geração de energia no mundo por fonte, em 2016, de acordo com o *Electricity Overview 2018*, da IEA, é exposta na Figura 1.



**Figura 1 - Geração de energia elétrica no mundo por fonte.**

Fonte: Adaptado de IEA (2018).

A pegada de carbono é usada para medir a quantidade de gás dióxido de carbono que é produzida em um dado processo, e, mesmo com o aumento da preocupação com a sustentabilidade, esta vem aumentando continuamente quando da produção de energia elétrica. Dentre as renováveis, a energia hidrelétrica apresenta uma pequena pegada de carbono, porém suas instalações geralmente não estão localizadas próximas às áreas de maior consumo, além de sua exploração muitas vezes não ser compatível com outros objetivos ecológicos para o uso da água. A energia eólica também apresenta uma pequena pegada de carbono, porém é uma geração não flexível, por ter baixa previsibilidade. Na energia solar, a disponibilidade é alta, no entanto, a pegada de carbono é maior do que em outros tipos de fontes renováveis, e também tem impacto por sua ocupação do solo, que em algumas regiões pode vir a ser um empecilho (PAYET *et al.*, 2019).

Na procura de soluções energéticas sustentáveis, organizações internacionais e mesmo muitos países se comprometem com políticas que buscam menor impacto ambiental. A União Europeia (UE), em sua Diretiva de Energia Renovável (em tradução livre), tem como meta que em 2020 o consumo de energia de fontes renováveis seja de 20% do total de fontes, tendo, cada país membro, sua meta específica. Os países se comprometeram também em incluir metas para eletricidade, aquecimento, transporte e políticas específicas (União Europeia, 2009).

Tendo a capacidade de apresentar emissão praticamente nula de poluentes do ar e de gases de efeito estufa (SOLANGI *et al.*, 2011), os sistemas de energia solar "possuem benefícios expressivos em comparação com fontes de energia convencionais" (TSOUTSOS *et al.*, 2005, p. 1). Porém, mesmo sendo uma solução energética renovável, a maneira como a energia solar é captada e como as tecnologias envolvidas no processo são projetadas ainda têm impacto ambiental significativo, uma barreira para atingir o ideal de uma fonte realmente limpa. Para transpô-la, é essencial a realização de análises de possíveis impactos e, então, possíveis soluções, tanto no âmbito da tecnologia quanto no de modelo econômico em que ela está inserida.

O modelo econômico linear, já consolidado na produção mundial em diversos setores, tem impactos ambientais expressivos, pois se baseia em extrair, transformar, produzir, utilizar e descartar (e, às vezes, reciclar ou incinerar) (Braungart *et al.*, 2003; Fiskel, 2009; Ellen MacArthur Foundation, 2013, *apud* LEITÃO, 2015), ameaçando os recursos naturais escassos do planeta.

Como uma alternativa moderna ao modelo convencional, com base em inovações de produtos, processos e modelos de negócio sustentáveis, surge a Economia Circular (EC), que preconiza por um modelo circular que recupera resíduos que seriam descartados no modelo linear, reintegrando-os à produção de novos bens de consumo (LEITÃO, 2015). Na EC, almeja-se a transição para uma economia baseada em serviços, na qual os consumidores são usuários de produtos e não donos de produtos, auxiliada por ações como reciclagem, reutilização e remanufatura (CHARLES *et al.*, 2016).

A Economia Circular pode ser definida como:

Um sistema econômico e industrial baseado na reutilização de produtos e matérias-primas, e na capacidade restaurativa dos recursos naturais, que também tenta minimizar a destruição de valor no sistema geral e maximizar a criação de valor em cada elo do sistema.

(Bastein *et al.*, 2013, *apud* KALMYKOVA, 2017, p. 5)

As vantagens decorrentes dessa lógica são inúmeras, dentre diminuir o custo dos materiais, alicerçar cadeias de suprimentos mais seguras e sustentáveis, reduzir impactos ambientais e emissão de gases de efeito estufa, entre outras. Estima-se que o modelo pode trazer uma economia de até 600 bilhões de euros para países da União Europeia, além de que a medida para aumentar a produtividade em 30% até



2030 poderia aumentar o PIB em quase 1% e criar 2 milhões de novos empregos nos países da UE (KALMYKOVA, 2017).

A implementação de um modelo de EC pode ser feita de duas maneiras: de uma forma ampla, abrangendo toda a economia de uma região; ou com um foco em setores-chave da economia, em um grupo de vetores, como produtos, materiais e substâncias (KALMYKOVA, 2017), como é o caso do setor de energia.

Como a produção de painéis fotovoltaicos, atualmente, depende do suprimento de matérias-primas críticas (CRMs), a integração de um modelo circular e de uma seleção apropriada de materiais pode aumentar o ciclo de vida e agrupar outras indústrias e outras cadeias de suprimento parceiras (CHARLES *et al.*, 2016).

O desenvolvimento de novos estudos sobre materiais e produção de painéis possibilita a criação de tecnologias com custos reduzidos, facilidades na instalação e menor impacto ambiental. Porém, para que logo nos primeiros estágios de pesquisa e implementação já se chegue próximo de uma energia realmente limpa, é necessário fazer uma completa otimização de ciclo de vida sob uma ótica da Economia Circular (CHARLES *et al.*, 2016), o que será explorado neste trabalho.

A integração de um modelo adequado possibilita crescimento econômico ao passo em que traz soluções para problemas de impacto ambiental. Assim, analisando tecnologias, arquitetura de células e seleção de materiais sob a luz da literatura selecionada pela Revisão Sistemática de Literatura (RSL), esta pesquisa prioriza os tópicos mais relevantes para o contexto da EC.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar, a partir da literatura, as principais tecnologias de painéis fotovoltaicos no contexto da economia circular.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Definir e caracterizar o conceito de Economia Circular;
- Caracterizar as principais tecnologias de painéis fotovoltaicos, identificando materiais, equipamentos e componentes utilizados na sua produção;
- Relacionar o modelo de Economia Circular com a produção de painéis fotovoltaicos;
- Identificar conformidades e inconsistências na produção de painéis fotovoltaicos frente ao modelo de Economia Circular.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Com o grande crescimento do mercado de painéis fotovoltaicos, cresce a preocupação ambiental relacionada à fabricação dos painéis e ao tratamento dos resíduos de fim de vida dos módulos fotovoltaicos. Necessita-se uma análise da viabilidade da aplicação de um modelo de economia sustentável que traga soluções ambientais e econômicas na fabricação dos painéis.

Para haver uma cadeia de produção adequada economicamente e ambientalmente é necessário que políticas regulatórias sejam desenvolvidas, que responsabilizem a indústria e que fomentem o uso de materiais reciclados, além da conscientização do consumidor. Para tal, deve haver sincronia entre as indústrias que fabricam os painéis, os laboratórios de pesquisas de inovação em fotovoltaicas, as indústrias de reciclagem e uma sociedade de consumidores conscientes em suas tomadas de decisão.

Este trabalho busca fazer uma análise bibliográfica para demonstrar a sustentabilidade por meio da Economia Circular na fabricação de painéis fotovoltaicos, buscando novas tecnologias de inovação neste mercado.

### 1.3 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A monografia está organizada em 4 seções. O primeiro capítulo apresenta a introdução e contextualização do tema do trabalho, além dos objetivos e justificativas para a pesquisa.

O segundo capítulo descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa e as etapas e procedimentos de coleta e análise de dados.

O terceiro capítulo expõe os resultados da Revisão Sistemática da Literatura bem como os resultados da análise do portfólio final. Discute as três gerações de painéis fotovoltaicos e sua composição, a caracterização da Economia Circular e sua aplicação nas fotovoltaicas, diferentes tecnologias de painéis, e os resultados de discussão de portfólio.

O quarto capítulo contém a conclusão da pesquisa.

## 2 METODOLOGIA

Para a realização de uma pesquisa, necessita-se de um planejamento sistemático e adequado, cujas etapas proporcionam o alcance dos objetivos propostos. Este capítulo aborda a caracterização desta pesquisa, as etapas do procedimento do trabalho e os métodos aplicados na obtenção e análise dos dados.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Gil (2002), uma pesquisa pode ser de natureza básica ou aplicada, classificada em seus objetivos como exploratória, descritiva ou explicativa. Devido à pouca disponibilidade de artigos científicos e trabalhos que inter-relacionem os três eixos desta pesquisa, esta é classificada como uma análise exploratória, pois reúne conceitos existentes para criar propostas de linhas de estudo, para que, através de levantamento bibliográfico, o tema se torne mais discutido.

A metodologia de pesquisa empregada possui análise de dados de abordagem qualitativa, na qual os dados coletados não requerem métodos estatísticos. Tem como objetivo os processos de pesquisa e seus significados (SILVA; MENEZES, 2005).

Quanto ao procedimento técnico de pesquisa, ela se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica, que se apoia em materiais elaborados como artigos científicos, livros acadêmicos, teses, entre outras fontes.

O método adotado no desenvolvimento da pesquisa é a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), incorporando análise bibliométrica e de conteúdo.

Apesar das vantagens do método de revisão sistemática, salienta-se que este apresenta limitações sobre sua natureza intrínseca, como, por exemplo, a de ser retrospectiva, observacional e seletiva.

## 2.2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Esta seção descreve de forma detalhada todas as etapas do procedimento de pesquisa, assim como os métodos aplicados para obtenção e análise de dados.

### 2.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) (GOHR *et al.* 2013) é uma estratégia que limita erros e vieses de pesquisa bibliográfica. Segundo Cordeiro *et al.* (2007), é um modelo baseado em métodos rigorosos e explícitos para identificar, selecionar, coletar e analisar dados para descrever contribuições relevantes a uma dada pesquisa.

O estudo é constituído de artigos científicos, relatórios institucionais, acervo legal ou regulatórios internacionais.

A localização e seleção das bases de dados deve atender aos requisitos de disponibilidade de títulos; resumos e artigos completos; opção para operadores *booleanos*; e adequação aos temas do setor de sistemas de energia, tecnologias de painéis e economia. As bases de dados bibliográficas utilizadas nesta pesquisa são: *IEEE Xplore Digital Library*, *Scopus* e *Web of Science*, de acesso disponível a partir de Periódicos CAPES. Utilizando bases que possuem artigos de diversas editoras é possível abranger um número maior de estudos, aprimorando, assim, as buscas.

A primeira etapa é a de identificação e triagem, iniciando com a definição dos eixos de pesquisa e das palavras-chave, que são posteriormente usadas em combinações com operadores *booleanos* nas bases de dados supramencionadas. A delimitação dos temas de pesquisa, feita a partir de estudos primários em artigos científicos sobre o tema, implica na proposição de três eixos de pesquisa – Energia Fotovoltaica (Eixo 1), Tecnologia de Painéis Solares (Eixo 2) e Economia Circular (Eixo 3) –, que fundamentam e estruturam a indicação de palavras-chave para consultar às bases bibliográficas. As palavras-chave definidas como premissas para a realização da pesquisa, bem como os operadores e limitadores para truncamento entre elas e entre os eixos, podem ser consultadas no Quadro 1. Traduz-se as palavras-chave para o inglês para maior abrangência de resultados.

**Quadro 1 - Premissas utilizadas para a pesquisa.**

<b>Palavras-chave</b>	<b>Eixo 1</b>	<i>Solar energy technologies; Photovoltaic; Clean Energy.</i>	
	<b>Eixo 2</b>	<i>3GPV; DSSCs; OPV; Solar cells; R2R; Superior Design.</i>	
	<b>Eixo 3</b>	<i>Circular Economy; Cradle to cradle; Closed loop economy; Green supply chain; Life cycle.</i>	
<b>Operador</b>	<b>Booleano</b>	AND	Aplicado entre os eixos.
		OR	Aplicado entre as palavras-chave do mesmo eixo.
	<b>Truncamento</b>	Idioma do artigo	Português, inglês, espanhol e francês.
		Ano de publicação	2009 até 2019.
		Tipos de publicação	Artigos, <i>reviews</i> e <i>conference paper</i> .

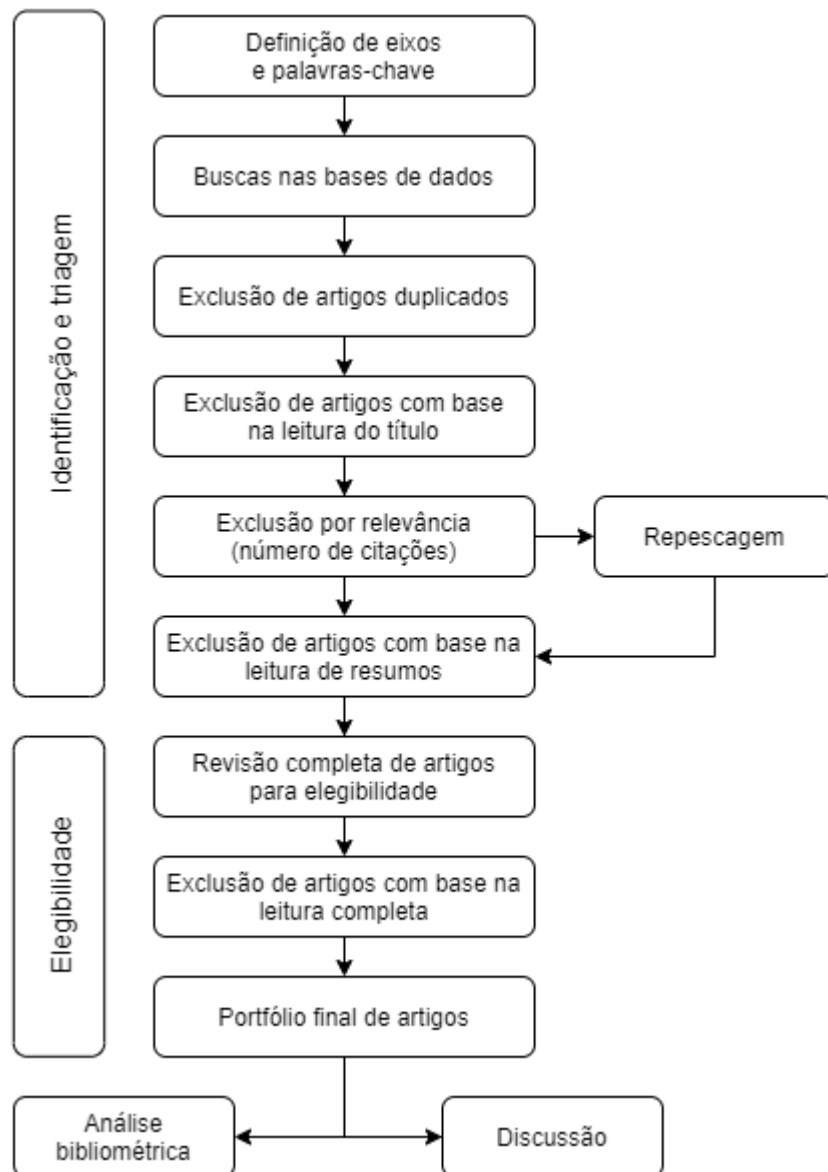
Fonte: Autoria própria.

Os operadores lógicos “AND” e “OR” foram utilizados para associar os eixos entre si, criando uma combinação chamada de *string* de busca. A *string* é uma sequência de caracteres, e é utilizada para se fazer as pesquisas de artigos científicos nas bases de dados. Os resultados obtidos a partir da *string* em cada uma das bases são salvos em formato *BibTex*, onde são organizados utilizando-se o *software Mendeley*.

A RSL possui um protocolo de pesquisa, que inicia com a estratégia de busca e organização de temas e eixos, para então se consultar as bases de dados e organizar o material encontrado. A fase de identificação e triagem filtra os artigos encontrados nas bases de acordo com as seguintes etapas: exclusão de artigos duplicados; relevância à pesquisa, com a exclusão pela leitura dos títulos; exclusão por relevância, ou seja, número de citações (que podem ser reincluídos na fase de repescagem); e exclusão dos artigos não necessários após a leitura dos resumos. Na fase de exclusão por relevância, as referências são consultadas pela ferramenta *Google Scholar*, de onde é obtido o número de citações, assim sendo possível avaliar o grau de representatividade de cada referência.

Na fase de elegibilidade se faz a revisão completa dos artigos, excluindo os que não são relevantes para a pesquisa com base na leitura completa. Após esta fase, tem-se então o portfólio final de artigos, a partir do qual é feita a análise bibliométrica e a discussão.

Um fluxograma do processo pode ser visualizado na Figura 2.



**Figura 2 - Fluxograma da RSL para o trabalho.**

**Fonte: Adaptado de Garcez (2016) e Mardani et al. (2016).**

Inicialmente, na etapa de definição das palavras-chave, as buscas nas bases de dados foram feitas incluindo-se dois parâmetros que, em análise posterior,

foram descartados. Estes foram: a utilização da palavra chave “*perovskite*” no Eixo 2, que se mostrou excessivamente específica, o que excluiria assim artigos relevantes para o trabalho; e as buscas nas bases terem sido feitas inter-relacionando os três eixos de pesquisa dois a dois, o que resultou em milhares de trabalhos quando da relação do Eixo 1 e Eixo 2, e poucos trabalhos, mais relevantes para a pesquisa, quando da relação destes eixos com o Eixo 3.

Optou-se, então, pela inter-relação simultânea entre os três eixos, com a criação de uma única *string* de busca que contemplasse todas as palavras-chaves. A *string* selecionada para ser utilizada nas três bases de dados resultou na seguinte:

*(“solar energy technologies” OR photovoltaic OR “clean energy”) AND (3gpv OR dsscs OR opv OR “solar cells” OR r2r OR “superior design”) AND (“circular economy” OR “cradle to cradle” OR “closed loop economy” OR “green supply chain” OR “life cycle”)*

E etapa de seleção por relevância, ou seja, pelo número de citações, foi feita de forma com que os artigos selecionados fossem os correspondentes a 95% das citações totais, o que permitiu com que apenas os mais relevantes fossem escolhidos.

Durante as etapas de leitura dos títulos, dos resumos e da leitura completa dos artigos, considerou-se critérios de inclusão e de exclusão, ou seja, se os artigos abordavam os tópicos compreendidos nos objetivos da pesquisa.

Critérios de inclusão:

- Economia Circular;
- Terceira geração de fotovoltaicas;
- Reincorporação de resíduos fotovoltaicos no início do ciclo de vida.

Critérios de exclusão:

- Tensão de circuito aberto;
- Fatores de custo;
- Lógica *fuzzy*.

Com o portfólio final de artigos, pode então se realizar o seu processo de categorização, que é constituído de análise bibliométrica e discussão do portfólio.



### 2.2.2 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica, segundo Vilela (2012), consiste em evidenciar os dados estatísticos dos artigos do portfólio quantitativamente e organizá-los em parâmetros como autores, publicações, citações, base de dados e periódicos. Os resultados estatísticos da análise avaliam a relevância do conteúdo científico das publicações.

A análise avalia os autores e instituições mais produtivas, além de periódicos mais utilizados. Neste trabalho faz-se a análise de distribuição de artigos por número de citações, relevância dos periódicos, incidência de palavras-chave e ano de publicação.

### 2.2.3 Análise de Conteúdo

Foram utilizados artigos selecionados com base nas pesquisas de palavras-chave para a elaboração do referencial teórico, que passaram pela fase de Identificação e Triagem, da Figura 2, e entraram para a fase de Elegibilidade. Nesta fase, os artigos foram pré-analisados na etapa de leitura completa dos artigos, que buscou identificar textos que abordassem o conceito de Economia Circular para a fabricação de painéis e para a recuperação de resíduos de fim de vida a fim de serem reutilizados na cadeia de produção de novos produtos.

A leitura e extração do conteúdo dos artigos foi feita realçando seus pontos mais relevantes para a pesquisa em fichas de leituras organizadas no *software Evernote*, onde as informações foram condensadas e agrupadas para a verificação de conceitos comuns entre os artigos e técnicas tanto correlacionadas quanto diferenciadas para a abordagem do tema.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta primeiramente o portfólio bibliográfico, seguido dos resultados da análise bibliométrica referentes à Revisão Sistemática da Literatura, com dados que explicitam a relevância da escolha dos artigos que compõem este trabalho.

Em seguida, encontra-se a discussão do portfólio bibliográfico com a análise sobre soluções sustentáveis na produção de painéis fotovoltaicos e na reincorporação dos resíduos de painéis no seu início de ciclo de vida, na lógica da EC.

#### 3.1 RESULTADOS DA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO

Com base nos resultados das pesquisas nas bases de dados com a *string* da seção 2.2.1, as pesquisas foram refeitas, e um total de 437 artigos foram selecionados, salvos em arquivo *BibTex* e inseridos no *software Mendeley*. A Tabela 1 apresenta o número de artigos obtidos por base de dados.

**Tabela 1 - Número de artigos obtidos nas bases de pesquisa.**

<b>Base de dados</b>	<b>Total de artigos</b>
IEEE	57
Scopus	227
Web of Science	153

**Fonte: A autoria própria.**

Em seguida, de acordo com a Figura 2, o processo de identificação e triagem continua, com a exclusão dos artigos duplicados, exclusão pela leitura de títulos, seleção por relevância, repescagem dos artigos e exclusão pela leitura dos resumos. Na fase de elegibilidade foram selecionados os artigos após a exclusão pela leitura do texto completo. Na Tabela 2 encontra-se o número total de artigos obtidos após cada uma das etapas.

Tabela 2 - Resumo da filtragem do portfólio.

Etapa	Total de artigos
Soma das três bases	437
Remoção de duplicados	328
Leitura dos títulos	146
Exclusão pelo ano de publicação (10 anos)	121
Seleção por relevância	74
Com repescagem	88
Leitura dos resumos	31
Leitura completa	14

Fonte: Autoria própria.

A etapa da repescagem permitiu reincluir 14 artigos, que, mesmo tendo poucas citações, voltaram a compor o conjunto de artigos para análise por serem artigos recentes e relevantes para a pesquisa. O motivo pelo qual possuíam poucas citações pode ser pelo fato de serem recentes o suficiente para que poucas pesquisas subsequentes tenham sido feitas os citando.

Após a etapa da leitura completa dos artigos, definiu-se o portfólio com 14 artigos. Após sua definição, devido a novas buscas e à proximidade com o tema, foi incluído um artigo publicado em 2020, intitulado “*The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production – A life cycle assessment of environmental impacts*”. Esta ação, que não faz parte da Revisão Sistemática de Literatura, pode ser justificada devido à relevância deste artigo para o presente trabalho e sua publicação ter sido posterior à janela temporal de busca estruturada.

Os 15 artigos que compõem o portfólio final, que relacionam título do artigo, autor e ano de publicação, estão disponíveis no Apêndice A.

No Apêndice B é encontrada uma análise de conteúdo que sintetiza as principais contribuições e considerações de cada artigo para os resultados de discussão de portfólio.

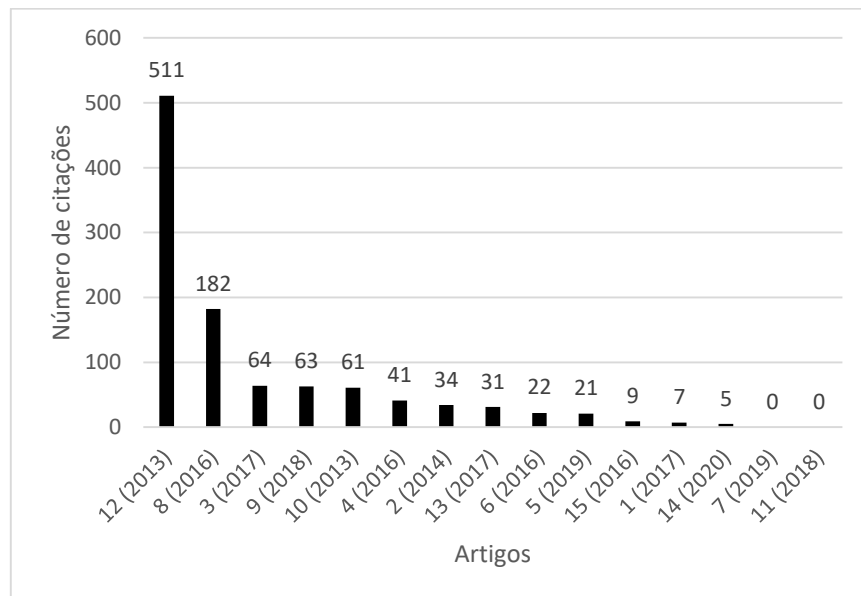
## 3.2 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Nesta seção é apresentada a análise bibliométrica dos artigos que compõem o portfólio final, as avaliando, assim, quantitativamente e analisando determinados comportamentos.

### 3.2.1 Número de Citações

Para analisar o reconhecimento científico, ou a relevância, do portfólio, foi levantado o número de citações de cada artigo no *Google Scholar*.

Na Figura 3 apresenta-se o número de citações de cada artigo. Para facilitar a visualização, os nomes dos artigos não foram ilustrados, mas sim o número correspondente a cada um deles, conforme o Quadro 2.



**Figura 3 - Classificação dos artigos por quantidade de citações.**

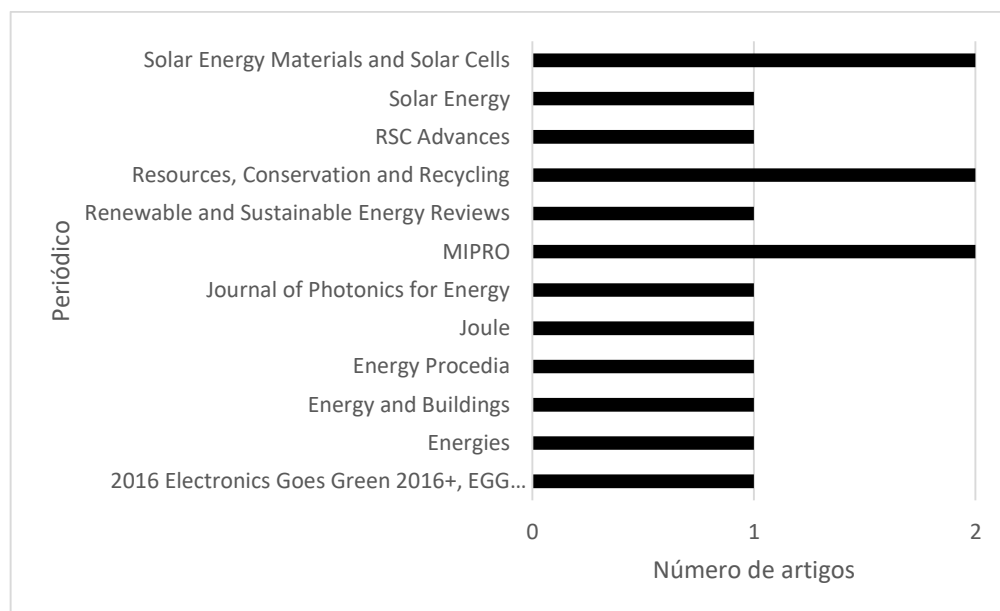
Fonte: Autoria própria.

Os três artigos com o maior número de citações são os trabalhos de Darling *et al.* (2013), com 511 citações, Song *et al.* (2016), com 182 citações, e Gaustad *et al.* (2017), com 64 citações, totalizando aproximadamente 72% do total de citações do portfólio.

### 3.2.2 Relevância dos Periódicos

A análise bibliométrica de relevância dos periódicos avalia quais os periódicos mais utilizados pelos autores dos artigos existentes no portfólio. Assim, permite-se identificar qual periódico é mais relevante para a pesquisa, ou seja, em qual é possível encontrar mais publicações sobre a produção de painéis fotovoltaicos sob uma ótica de Economia Circular.

O gráfico da Figura 4 apresenta todos os periódicos nos quais os artigos do portfólio final foram publicados.



**Figura 4 - Relevância dos periódicos no portfólio final.**

**Fonte:** Autoria própria.

Os três periódicos nos quais havia mais de um artigo do portfólio final publicado foram o “*Solar Energy Materials and Solar Cells*”, “*Resources, Conservation and Recycling*” e “*International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and microelectronics (MIPRO)*”, neste último em que um dos artigos foi publicado em sua 40ª edição, em 2017, e outro em sua 41ª edição, em 2018.

### 3.2.3 Ocorrência de Palavras-chave

A análise bibliométrica da incidência de palavras-chave verifica o alinhamento dos artigos do portfólio com o tema do trabalho. Compara-se as palavras-chave escolhidas pelo autor com aquelas selecionadas para o processo da RSL, contidas no Quadro 1.

A ocorrência de palavras-chave nos artigos do portfólio bibliográfico é apresentada na Tabela 3, onde pode-se constatar que as seis palavras-chave de maior relevância para o portfólio final são “*Life cycle assessment (LCA)*”, “*Photovoltaics*”, “*Recycling*”, “*Energy payback time (EPBT)*”, “*Thin-film*” e “*Circular economy*”.

**Tabela 3 - Ocorrência de palavras-chave nos artigos do portfólio final.**

<b>Palavras-chave</b>	<b>Ocorrência no portfólio</b>
<i>Life cycle assessment (LCA)</i>	4
<i>Photovoltaics</i>	4
<i>Recycling</i>	4
<i>Energy payback time (EPBT)</i>	3
<i>Thin-film</i>	2
<i>Circular economy</i>	2

Fonte: Autoria própria.

As demais palavras-chave, não contidas na Tabela 3, tiveram apenas uma ocorrência.

### 3.2.4 Distribuição de Artigos pelo Ano de Publicação

O intervalo dos anos das publicações foi considerado como entre 2009 e 2019, antes da inclusão posterior do artigo de 2020. Porém, verifica-se que o ano com o maior número de publicações é o de 2016, com 4 dos artigos, correspondente a quase 27% do portfólio, seguido do ano de 2017, com 3 publicações, enquanto os anos de 2013, 2018 e 2019 tiveram, cada um, 2 publicações.

### 3.3 DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO

Baseando-se nos 15 artigos do portfólio final, discute-se os trabalhos para que se possa explorar a sustentabilidade das tecnologias de painéis fotovoltaicos sob a ótica de recuperação de resíduos de fim de vida e sua reincorporação na produção.

Nesta seção será abordada a caracterização do termo Economia Circular, a composição dos painéis fotovoltaicos e quais são os materiais usados na sua fabricação e as tecnologias disponíveis no mercado de acordo com as três gerações de fotovoltaicas.

Ao longo da seção as tecnologias para a fabricação dos painéis serão abordadas sob a ótica da Economia Circular, ou seja, a análise do ciclo de vida é feita de maneira que os resíduos de fim de vida possam retornar para a produção de novos painéis por meio de reciclagem e tratamento adequados.

#### 3.3.1 O Modelo de Economia Circular nas Fotovoltaicas

##### 3.3.1.1 Princípios da Economia Circular

Os modelos econômicos lineares enfrentam limites ambientais e não são sustentáveis, se tornando necessário refletir sobre uma transição para um modelo de Economia Circular (EC), com a implantação de tecnologias de energia limpa e sustentável. Com a recuperação e reciclagem de materiais, maximiza-se a produção, pois a demanda por extração de matéria-prima diminui graças à reutilização de material recuperado. Conceitos como “fim de vida” (*End-of-Life* – EoL) e “desperdício” são substituídos por “restauração” e “recursos” (CHARLES *et al.*, 2016).

A EC busca novas definições para o crescimento econômico, ambiental e social. Tem como princípio a eliminação da poluição e de resíduos de produtos de fim de vida, mantendo-os em uso e regenerando os sistemas naturais. “Implica o desacoplamento gradual da atividade econômica de consumo de recursos finitos e a eliminação dos resíduos do sistema” (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

A Economia Circular é um modelo que permite repensar as práticas econômicas da sociedade atual e que se inspira no funcionamento da própria Natureza. É indissociável da inovação e do *design* de produtos e sistemas. Inclui-se num quadro de desenvolvimento sustentável baseado no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos, permitindo a redução no consumo de matérias-primas, energia e água. Promove o desenvolvimento de novas relações entre as empresas, que passam a ser simultaneamente consumidoras e fornecedoras de materiais que são reincorporados no ciclo produtivo.

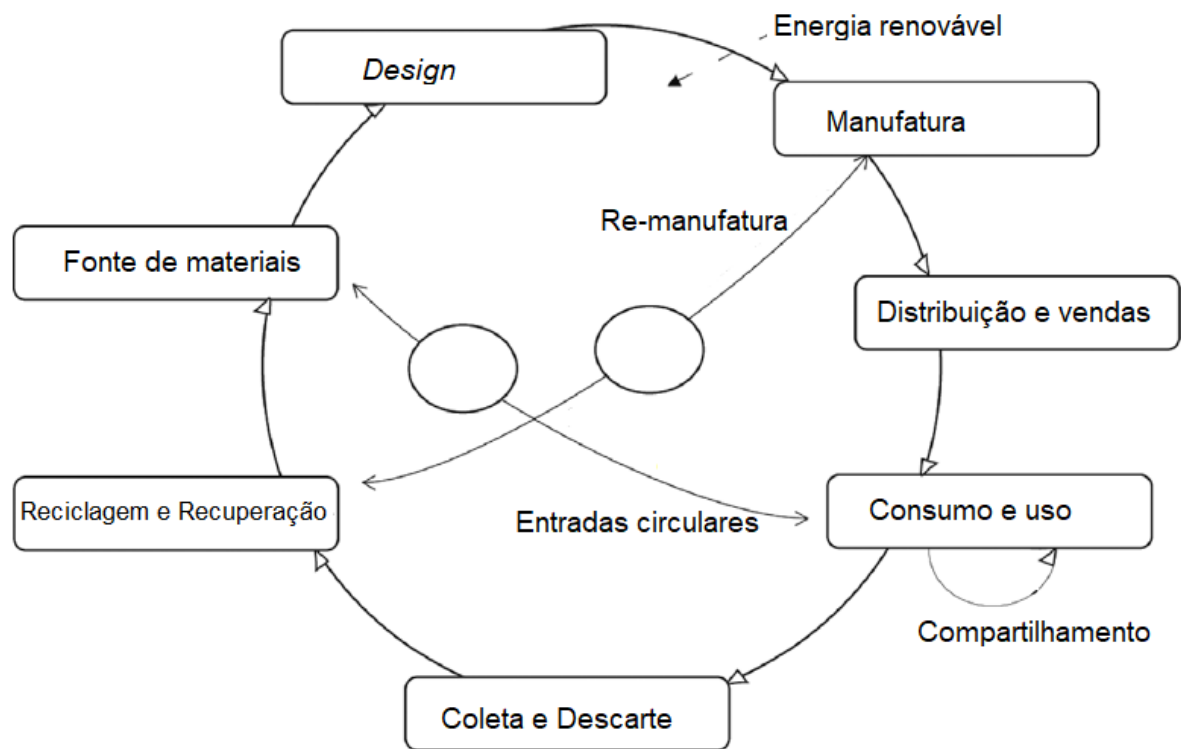
(Ellen MacArthur Foundation, 2012, 2013, 2014, *apud* LEITÃO, 2015, p. 5)

Outros termos semelhantes também exprimem a ideia de EC, como “economia de circuito fechado” e “economia de desperdício zero”, e, como a EC abrange diversas áreas como engenharia, estratégia, sustentabilidade, estudos de casos, outros termos podem estar relacionados à EC, como “gestão da cadeia de abastecimento verde”, “economia de desempenho”, “berço a berço”, “simbiose industrial”, entre outros (KALMYKOVA *et al.*, 2017).

Prioriza-se, aqui, a recuperação, a reciclagem e a reutilização. O benefício disso é uma economia em valores econômicos e também ambientais. Sempre que o custo de logística reversa (que parte inicialmente da reciclagem para a indústria), ou seja, recuperação de resíduos de fim de vida para reincorporá-los em um novo ciclo de vida, for menor do que o custo de produção em modelos lineares, a Economia Circular se mostra uma alternativa mais eficiente e menos custosa. Conforme os preços de matéria-prima aumentam, os benefícios econômicos da EC são ainda mais visíveis. A EC pode, também, elevar ativos intangíveis de uma companhia como o seu valor de marca, conforme os consumidores se tornam mais conscientes ambientalmente (CHARLES *et al.*, 2016).

Uma possível cadeia de valor de uma Economia Circular é representada na Figura 5. A diferença desta em relação ao modelo de economia linear é a de que, aqui, tem-se um circuito fechado de fluxo de materiais, além de ser impulsionada pelo uso de energias renováveis nos seus processos de manufatura. “As Entradas Circulares são entradas de recursos ou, em geral, materiais que duram mais do que um único ciclo de vida e podem ser facilmente regenerados” (KALMYKOVA *et al.*, 2017, p. 2).





**Figura 5 - Fluxo de recursos ao longo de uma cadeia de valor em uma Economia Circular.**

Fonte: Adaptado de KALMYKOVA *et al.* (2017).

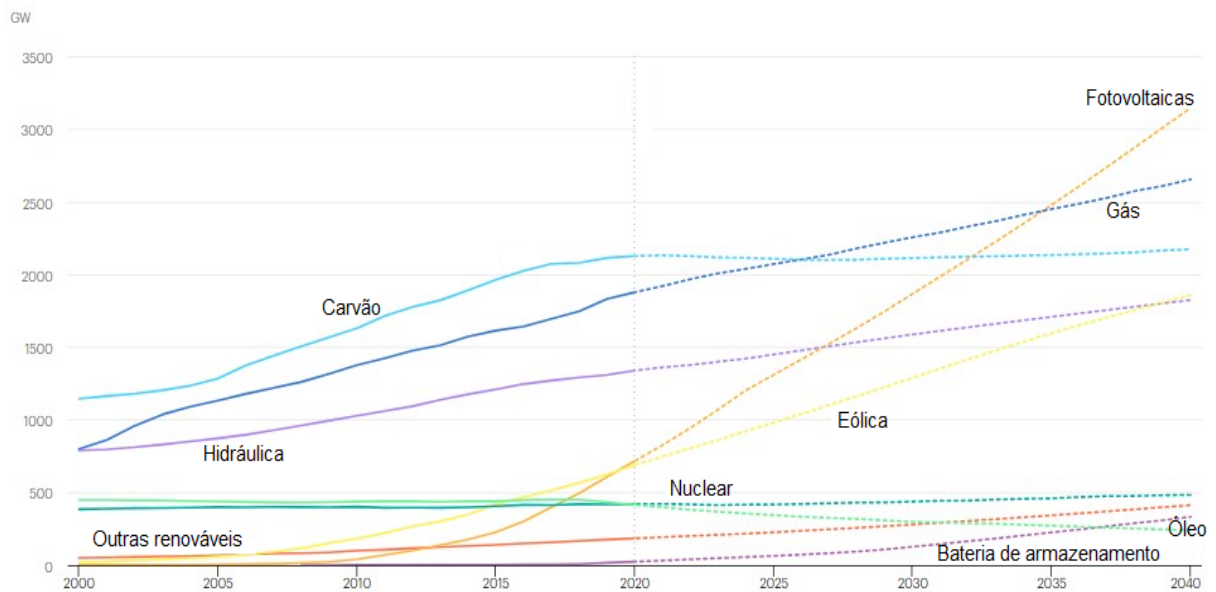
Em um modelo de Economia Circular, os processos diferem de um modelo econômico linear mesmo além das etapas de fabricação. Conforme a Figura 5, nota-se o compartilhamento do produto na etapa de consumo e uso, o que pode indicar um consumidor mais consciente sobre o seu consumo e descarte. Como o fluxo de recursos e materiais é fechado, a EC necessita de um sistema eficiente de coleta, reciclagem e recuperação de materiais, para que estes então sejam reincorporados a um novo ciclo de produção.

### 3.3.1.2 O Cenário da Economia Circular nas Fotovoltaicas

Módulos fotovoltaicos têm uma média de vida útil de 20 a 30 anos, e depois se tornam produtos de fim de vida. Conforme a Agência Internacional de Energia (IEA), em seu *Stated Policies Scenario* (Cenário de Políticas Declaradas), a energia solar se tornará a maior fonte de energia no quesito de capacidade instalada em torno de 2035, ultrapassando carvão e gás, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 6 (IEA, 2019).

Em tal cenário, existirão muitos módulos em fim de vida que necessitarão de uma estratégia de gestão de resíduos de fim de vida eficiente para que estes possam ser reincorporados no início de ciclo de vida.

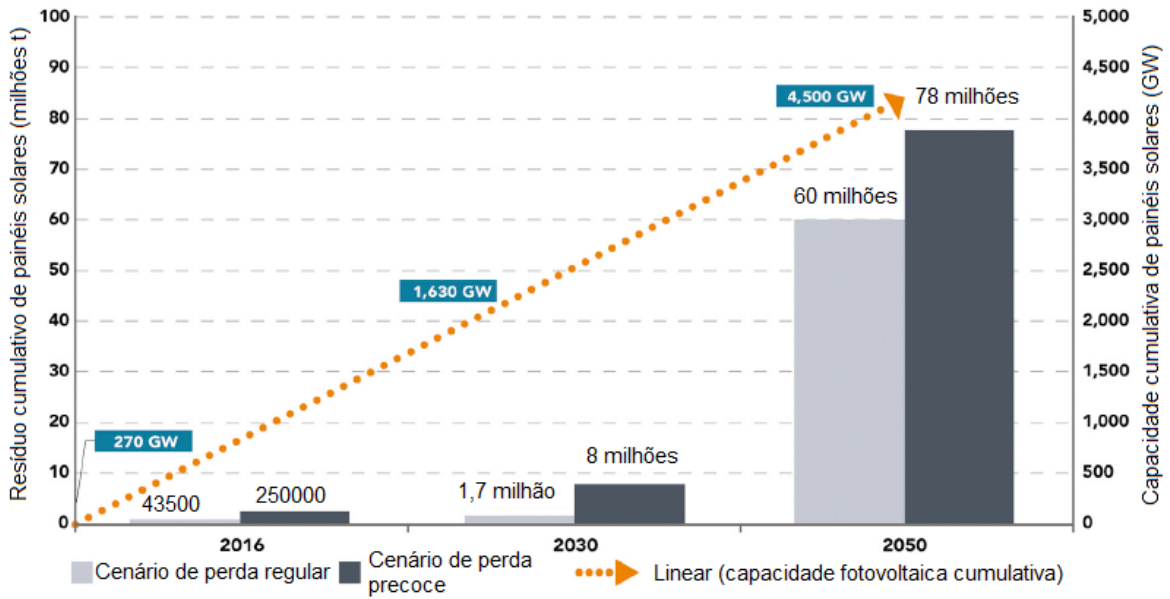
A infraestrutura para recuperação e reciclagem adequada de módulos solares ainda não foi desenvolvida em muitos países, e grande parte de pesquisas de recuperação estão em fase de laboratório (MAHMOUDI *et al.*, 2019).



**Figura 6 - Capacidade instalada de geração de energia por fonte no Cenário de Política Declaradas, 2000-2040.**

Fonte: Adaptado de International Energy Agency (IEA) (2019).

Apenas 1% dos painéis fotovoltaicos instalados – que totalizam 222 GW – chegou em seu fim de vida, representando assim uma pequena fração dos Resíduos dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE, *Waste Electrical and Electronic Equipment*). Até 2050, com a expansão da capacidade instalada de painéis, esperada em 4500 GW, conforme Figura 7, os resíduos de fotovoltaicos podem chegar a até 10%, ou 60 milhões de toneladas, de todos os WEEE gerados globalmente. Assim, a necessidade de métodos eficientes de recuperação de componentes mostra-se evidente, já que todas as tecnologias de PV contêm materiais valiosos que podem ser reincorporados em seu ciclo de vida ou no de outros produtos (KADRO *et al.*, 2017).



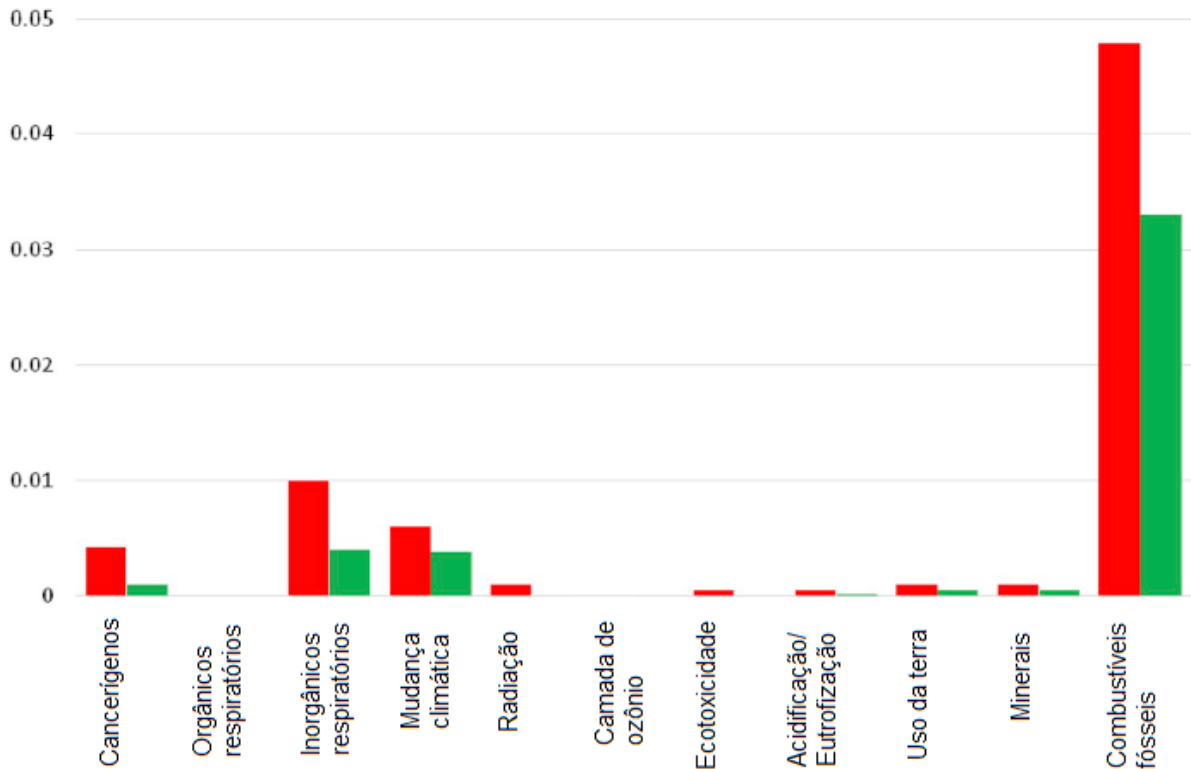
**Figura 7 - Estimativa cumulativa do volume global de resíduos de fim de vida de painéis fotovoltaicos.**

Fonte: Adaptado de KADRO *et al.* (2017).

De acordo com KADRO *et al.* (2017, p. 1), “é estimado que a matéria-prima extraída de resíduos de painéis possa resultar num valor acumulado de 450 milhões de dólares até 2030”. Este valor pode ser comparado ao valor dos componentes e materiais para a produção de 60 milhões de novos painéis, equivalentes à 18 GW, com a eficiência encontrada nas tecnologias atuais.

Além do valor econômico agregado de um modelo circular, a recuperação de resíduos de fim de vida de fotovoltaicas reduz também os impactos no meio ambiente e na saúde do ser humano.

O uso de recursos primários tem impactos ambientais associados com o uso de materiais tóxicos que podem ser atenuados com um modelo de EC. No âmbito dos impactos ambientais, a Figura 8 ilustra dois possíveis cenários para módulos fotovoltaicos de c-Si em fim de vida, o do descarte e o da reciclagem e reutilização dos painéis com a base do semiconductor reciclada. O impacto ambiental é expresso em “pontos ambientais”, que expressam os resultados normalizados.



**Figura 8 - Resultados após normalização da produção de células solares de c-Si sem (barras vermelhas) e com (barras verdes) o uso de silício reciclado.**

Fonte: Adaptado de KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.* (2020).

Da Figura 8, nota-se que a utilização de resíduos fotovoltaicos reciclados para a fabricação de novos painéis demonstra um impacto ambiental menor em todos os onze quesitos analisados.

Os principais processos de fabricação de PV necessitam de eletricidade, e, assim, para a redução dos impactos ambientais ligados à produção deve-se considerar a questão da matéria-prima, a energia demandada, o aquecimento global, a acidificação e os resíduos (DUBEY *et al.*, 2013).

Para garantir viabilidade econômica dos investimentos em resíduos de fotovoltaicas, é necessário haver uma quantidade considerável de resíduos de módulos para serem trabalhados, o que necessitaria de um sistema de monitoramento de tais resíduos. Assim, todo país que fomenta a produção, instalação e utilização de tecnologias fotovoltaicas necessitaria de uma gestão estratégica para os módulos em fim de vida (MAHMOUDI *et al.*, 2019), sendo esta possível com o fomento de pesquisas científicas, com a criação de normas e leis que regularizem e

responsabilizem os produtores de painéis e com a união entre os países para a implementação da economia circular no ciclo de vida das fotovoltaicas.

### 3.3.2 As Três Gerações de Painéis Fotovoltaicos

As três gerações de fotovoltaicas são divididas a partir da mais antiga até a mais moderna, e são classificadas de acordo com os diferentes materiais utilizados para a fabricação dos módulos e das células fotovoltaicas.

A primeira geração, a mais antiga tecnologia de painéis fotovoltaicos e de maior dominância no mercado atual, é a de silício cristalino (*crystalline silicon*, c-Si), principalmente por sua eficiência elevada, entre 14 e 22%, e sua estabilidade operativa.

A segunda geração de fotovoltaicos possui tecnologia de filme fino, que inclui silício amorfo (a-Si); telureto de cádmio (CdTe); cobre, índio e selênio (CIS); e cobre, índio, gálio e selênio (CIGS). Essa geração correspondia a cerca de 7% da produção mundial em 2015. “A segunda geração necessita de menos materiais e menor energia para sua produção e oferece menor custo de geração de eletricidade, curto tempo de retorno de energia [*energy payback time* – EPBT] e emissões reduzidas associadas à geração de eletricidade.” (CHARLES *et al.*, 2016)

A terceira geração de fotovoltaicas (3GPV) é conhecida também como fotovoltaica imprimível (*Printable Photovoltaic*, PPV), que são dispositivos de filme fino, que incluem células solares sensibilizadas por corantes (*Dye-Sensitized*, DSSCs), células fotovoltaicas orgânicas (*Organic Photovoltaics*, OPVs) e células de perovskita (*Perovskite Solar Cells*, PSCs) (CHARLES *et al.*, 2016). Também fazem parte os concentradores fotovoltaicos (*Concentrated Photovoltaics*, CPV, ou *High Concentrated Photovoltaics*, HCPV) e multifuncionais III-V – assim chamadas pois o grupo III inclui: alumínio (Al), gálio (Ga) e índio (In); enquanto o grupo V inclui: arsênico (As) e fósforo (P) – que podem chegar a ter uma eficiência impressionante de até 41,4%, encontrado em módulos produzidos com a tecnologia HCPV, esta, porém, tendo um custo de fabricação mais elevado (PAYET *et al.*, 2019).

As PSCs são as mais novas tecnologias no mercado, com valor certificado de eficiência de conversão (PCE, do inglês *Power Conversion Efficiency*) de 22,1%, de acordo com o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) dos Estados Unidos

(RAPHAEL *et al.*). Pela característica do material ser transparente, uma possível vantagem seria a facilidade de incorporá-lo à arquitetura de prédios e residências, tendo um impacto visual reduzido.

A classificação das gerações de fotovoltaicas com a sua participação no mercado até 2015 e projetada para até 2030 e com sua eficiência está apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Participação no mercado e eficiência das três gerações de painéis fotovoltaicos.**

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

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

Da Tabela 4, pode-se observar que a projeção para 2030 demonstra que as tecnologias a base de silício continuarão tendo dominância de mercado. Porém, observa-se um grande aumento nas tecnologias da terceira geração, que podem ser promissoras caso um bom modelo econômico seja usado em seus processos de fabricação para que possam ser melhor agregadas ao cenário de fotovoltaicas do futuro, reduzindo os custos de fabricação ao passo em que os impactos ambientais são também reduzidos.

Utilizando-se de materiais mais abundantes e de tecnologias mais baratas, como a *roll-to-roll* (R2R, rolo a rolo, do inglês), a 3GPV aparece como uma opção inovadora no cenário de energia solar atual. Porém, mesmo vista como uma solução sustentável, tem impactos ambientais associados à sua produção, devido à necessidade contínua de suprimento de CRMs. Assim, logo nos primeiros estágios de pesquisa e implementação, para já se aproximar de uma energia realmente limpa, é necessário fazer uma completa otimização de ciclo de vida sob uma ótica de Economia Circular (CHARLES *et al.*, 2016).

### 3.3.2.1 Primeira Geração de Fotovoltaicas: Painéis Fotovoltaicos de Silício

Os painéis fotovoltaicos de maior representatividade são os de silício cristalino (c-Si), material semicondutor também conhecido como “silício de grau solar”, que representam aproximadamente 85-90% do mercado global. Em 2017, tecnologias de fotovoltaicas baseadas em silício somaram 95% da produção total (KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.*, 2020).

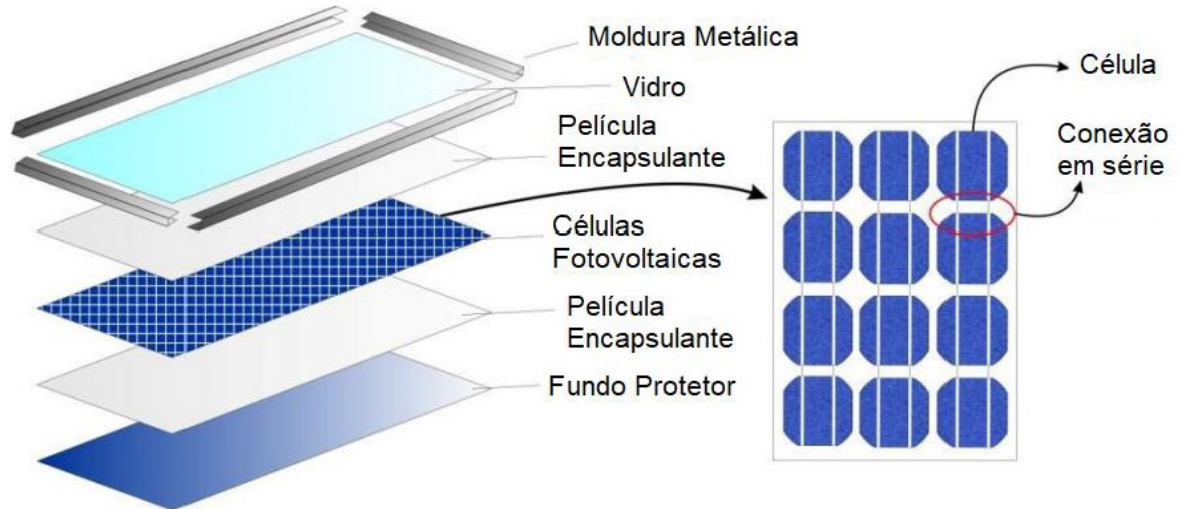
O silício é o semicondutor mais abundante no mundo, e, por sua estabilidade, dominou o mercado de fotovoltaicas por muitas décadas. Para a produção dos módulos, o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) é reduzido a silício de grau metalúrgico (MG-Si), para então ser purificado em silício de grau solar, com mais de 99,99% de pureza, processo no qual consome-se uma quantidade considerável de energia (LUDIN *et al.*, 2018).

O impacto ambiental do processo para a purificação do silício é alto, devido à “alta demanda de energia e uso de fornos de arco submerso e de indução” (KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.*, 2020), no qual podem ser emitidos elementos tóxicos, como o cloro. Uma possível solução para se ter uma produção mais limpa e com redução de custos é a inclusão de silício puro provindo de processos de reciclagem, por ser o material recuperável das células fotovoltaicas de maior importância.

Lingotes de silício monocristalino e policristalino de grau solar são cortados por fita ou serra de fio em bolachas (*wafers*) monocristalinas e policristalinas de tamanho 156 x 156 mm<sup>2</sup>. Após a serragem do *wafer*, a célula solar é produzida por corrosão, dopagem, serigrafia, revestimento e verificação. No estágio do módulo, as células são conectadas em um fio e então encapsuladas por duas camadas de vidro e plástico etileno-acetato de vinila (*Ethylene Vinyl Acetat* – EVA) antes da instalação no sistema (LUDIN *et al.* 2018, p. 14)

No âmbito da composição de painéis típicos de c-Si, são formados por, geralmente, cerca de 76% de um vidro especial (superfície do painel), 10% de polímero (encapsulante EVA – e *backsheet* – fundo protetor), 8% de alumínio (moldura), 5% de silício (células solares), 1% de cobre (interconectores) e menos de 0,1% de prata (linhas de contato), além de outros materiais, como estanho e chumbo. A película encapsulante EVA é usada para cobrir os dois lados da célula fotovoltaica, e as protege contra condições climáticas e danos mecânicos, enquanto o *backsheet*

é usado na parte de trás do painel (KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.*, 2020). A Figura 9 representa a composição de um típico painel fotovoltaico de c-Si.



**Figura 9 - Composição de um típico painel fotovoltaico de c-Si.**

Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2014).

Para cada tipo de produção a quantidade dos materiais varia, bem como o consumo de energia para 1 m<sup>2</sup> de painel varia de acordo com o tipo de silício utilizado, porém, para mono e policristalino a diferença é desprezível. Células de silício monocristalino são mais fáceis de serem reutilizadas quando recicladas.

De acordo com DUBEY *et al.*, 2013, “a maioria dos fabricantes de PV não produz todos os componentes sozinhos: materiais como vidro, alumínio e cobre são produzidos em processos convencionais por fabricantes tradicionais.”

Para que a aplicação do modelo de Economia Circular seja vantajosa, o impacto ambiental e os custos de produção utilizando resíduos em fim de vida deve ser menor do que quando feita a extração de matéria-prima. Como há redução no consumo de energia no processo de fabricação de c-Si de alta pureza com silício recuperado de painéis reciclados, o impacto ambiental da produção pode ser reduzido em 58% (KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.*, 2020).

O aumento e volatilidade nos preços de matérias-primas, a preocupação global com os recursos naturais e o aumento dos custos de produção de materiais faz com que a aplicação de um modelo de EC seja economicamente interessante para as indústrias que dependem de suprimento de CRMs (CHARLES *et al.*, 2016).



Os resíduos de fim de vida recuperados se tornam materiais em cascada, que substituem os materiais primários e funcionam como base para o ciclo de vida de outros produtos de diferentes aplicações. Assim, por meio de simbiose industrial, a indústria pode valorizar os resíduos de fotovoltaicas até mesmo para outras aplicações. Porém, isso só é possível com *design* adequado para a desmontagem e separação dos materiais, que assegure sua longevidade (CHARLES *et al.*, 2016).

As aplicações dos materiais recuperados de módulos fotovoltaicos em outras indústrias são inúmeras, como para a produção de baterias de íons de lítio, geopolímeros, cimento, tijolo, cerâmica (e azulejos de cerâmica), cosméticos e tintas (MAHMOUDI *et al.*, 2019). Além, é claro, de sua utilização no início de ciclo de vida da produção de novos painéis.

Existem dois passos na reciclagem do silício, o tratamento térmico e o tratamento químico.

Para recuperar o silício como um *wafer* adequado para uso como substrato na produção de novas células, a moldura de alumínio e a caixa de junção devem ser desmontadas manualmente, e a camada de laminado poli EVA deve primeiro ser removida do módulo por processos térmicos ou químicos. Então, com uma mistura de álcalis ou ácidos, a camada antirreflexo, a metalização da superfície frontal, a parte de trás da célula e a junção p-n devem ser removidas. Para separar as células individuais, escolhe-se um método térmico. Este permite a desmontagem rápida, simples e economicamente eficiente do módulo, sendo o primeiro estágio da reciclagem do módulo fotovoltaico [...]. Esse processo de reciclagem consome energia, mas como até 85% das células recicladas são reutilizadas, o consumo de energia ao fabricar novos módulos fotovoltaicos é reduzido em até 70%.

(KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.* 2020, p. 4)

Na etapa de tratamento termal, os módulos são colocados em uma fornalha, empilhados, e queimados a uma temperatura de 600 °C, porém, devido à degradação térmica do EVA, existe emissão de gases tóxicos. Os materiais orgânicos são gaseificados e os restantes (células solares, vidro e metais) vão para um separador. O vidro é reciclado por métodos padronizados, enquanto a célula fotovoltaica é processada na segunda etapa (DUBEY *et al.*, 2013).

A etapa de tratamento químico remove as diferentes camadas da superfície celular, e é a etapa mais importante na reciclagem. Existe um processo de gravação, que deve continuar até que todas as camadas sejam removidas, atentando para não ter grandes perdas de silício. As células base devem ser adequadas para serem

incorporadas como novas células, então não devem ser muito finas. O tamanho padrão assumido é o de 156 x 156 mm<sup>2</sup> e de espessura de 270 a 300 µm (KLUGMANN-RADZIEMSKA *et al.*, 2020).

Recuperando-se o silício, novos módulos de fotovoltaicas podem ser produzidos com eficiência entre 12 e 15%, ou seja, com eficiência semelhante à dos painéis virgens.

### 3.3.2.2 Segunda Geração de Fotovoltaicas

A segunda geração de PV é formada pelas tecnologias de filme fino de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre índio (CIS) e seleneto de cobre índio-gálio (CIGS). Representava cerca de 7% do mercado mundial em 2015, conforme Tabela 4. Por mais que apresente vantagens em relação à primeira geração, como redução de emissões de gases e redução dos custos de eletricidade na fabricação, possui desvantagens como requerer processos de fabricação a vácuo custosos e conter materiais tóxicos como cádmio, índio, gálio e telúrio, “o que pode limitar a implementação generalizada dessa tecnologia” (CHARLES *et al.*, 2016).

Como o cádmio e telúrio podem representar entre 15 a 42% dos custos de fabricação do módulo, existe uma motivação financeira para a realização da reciclagem e recuperação de resíduos de fim de vida (GAUSTAD *et al.*, 2017). Para painéis de telureto de cádmio (CdTe), a sua maior produtora, a empresa estadunidense First Solar, realiza a reciclagem de seus painéis por meio de um esquema de variadas etapas, de separação dos módulos e dissolução do semicondutor. A empresa afirma reciclar 90% do vidro e 95% dos semicondutores. Como o telúrio usado para fotovoltaicas representa 40% do uso global, a sua escassez se torna o maior motivador para que a sua reciclagem seja realizada (KADRO *et al.*, 2017).

Devido às desvantagens citadas e ao possível cenário para os próximos anos disponível na Tabela 4, no qual o percentual da participação de mercado das tecnologias da segunda geração representa apenas 11,1%, face aos 44,8% das tecnologias da primeira geração e 44,2% das tecnologias da terceira geração, esta não recebe grande enfoque neste trabalho.

### 3.3.2.3 Terceira Geração de Fotovoltaicas (3GPV)

A terceira geração de fotovoltaicas, formada pelas tecnologias *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs), *Organic Photovoltaics* (OPVs) e *Perovskite Solar Cells* (PSCs) baseadas em haleto de chumbo, são dispositivos de filme fino baseados em camadas fotoativas moleculares, e são imprimíveis, produzidas com a tecnologia imprimível *roll-to-roll* (R2R), ou seja, rolo a rolo.

Por mais que a terceira geração de fotovoltaicas seja considerada sustentável, ela tem impactos ambientais associados à sua produção, sendo necessária a aplicação de um modelo de EC para a sua minimização.

Isto é alcançável com o processo de *ecodesign*, que considera: seleção de materiais de baixo impacto; otimização das técnicas de produção e redução do uso de materiais; otimização de modelos de negócios e sistemas logísticos; redução de impactos durante o uso; otimização dos estágios iniciais de vida dos produtos por meio do projeto para longevidade, atualização e reparo; e otimização de sistemas de EoL.

A otimização do ciclo de vida completo também requer colaboração intersetorial entre todas as partes envolvidas nos ciclos de vida do produto, incluindo: acadêmicos, fabricantes, gerentes de resíduos e *designers*, para permitir cascatas de reutilização, remanufatura e reciclagem, e para garantir fluxos circulares apropriados de produtos e materiais para economia ideal e benefícios ambientais e sociais.

(CHARLES *et al.*, 2016, p. 2)

Sobre sua composição, as inúmeras tecnologias da terceira geração têm em comum o uso de materiais de substrato e eletrodo, além dos materiais encapsulantes. Existem muitos materiais ativos diferentes em arquiteturas de células diferentes, dentre elas a célula “sanduíche”, com eletrodos e contra-eletrodos em diferentes substratos. As células dos módulos são conectadas eletricamente e encapsuladas em EVA (para módulos flexíveis) ou em vidro (para módulos rígidos). As células possuem dois eletrodos, um deles um vidro transparente revestido com óxidos condutores transparentes (TCO) ou plástico, como polietileno tereftalato (PET). O outro eletrodo pode ser produzido de um substrato análogo ao anterior ou de uma folha de metal (CHARLES *et al.*, 2016).

A terceira geração de fotovoltaicas, incluindo as OPV, têm uma participação de mercado insignificante hoje, e os volumes de resíduos são, conseqüentemente, pequenos. Até onde sabemos, não há sistemas

estabelecidos de reciclagem ou sistemas de *take-back* específicos para a OPV.

(KADRO *et al.* 2017, p. 11)

No caso das células de perovskita, foram realizadas tentativas de reciclagem em escala de laboratório, concentrando-se na recuperação do chumbo e na reutilização de componentes inteiros. A eficiência para a recuperação de chumbo foi de até 99,8%. Foi demonstrado por numerosos estudos que é possível reutilizar os eletrodos por meio de dissolução seletiva dos componentes solúveis individuais – HTM (*hole transport material*) e perovskita. O contra-eletródo pode ser removido mecanicamente ou em um banho de solvente (a recuperação do ouro por este meio é simples), e, após, a camada de perovskita é removida por solventes, o que apresenta desvantagens por serem materiais tóxicos e inflamáveis (KADRO *et al.*, 2017).

### 3.3.3 Roll-to-Roll (R2R)

O processo de fabricação R2R utiliza substratos flexíveis, o que traz maior abrangência de aplicações para as fotovoltaicas da terceira geração, que incluem metais como aço ou um filme condutor transparente (*transparent conducting film*, TCO), sendo o mais comum *Indium-Tin-Oxide* (ITO) *Polyethylene Terephthalate* (PET), para envelopes de construção e para materiais transparentes, respectivamente. A produção é feita por meio de processos sequenciais de deposição de materiais, em que as camadas de células solares são depositadas em etapas em filmes finos (de 10 nm a 10  $\mu$ m), até que o resultado no final do processo seja o produto revestido.

Uma variedade de técnicas de revestimento baseada em soluções é possível, incluindo: revestimento em barra, impressão em tela, deposição por spray, revestimento por imersão, revestimento por fenda e impressão a jato de tinta. O revestimento é seguido por tratamento térmico para remover solventes e curar filmes. Fornos de convecção e placas quentes têm sido empregados, mas rendimentos mais altos, tempo de processamento mais curtos e maior eficiência energética são alcançados com a cura NIR [*Near Infrared*, usada em processos de revestimento para reduzir o tempo de cura de minutos para segundos]. Para dispositivos baseados em vidro, o R2R não é uma possibilidade, e o vidro deve ser processado em folhas.

(CHARLES *et al.* 2016, p. 5)

O processo, na imagem usando como exemplo a fabricação de uma célula planar p-i-n de perovskita, pode ser representado pelo esquema da Figura 10. O substrato flexível TCO recebe uma camada de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), uma “camada de transporte de buraco” hole transport layer (HTL), a perovskita, e uma camada de contra eletrodo (cujas melhores performances são encontradas em metais nobres, numa deposição por evaporação termal), aqui representado pelo ouro (Au).

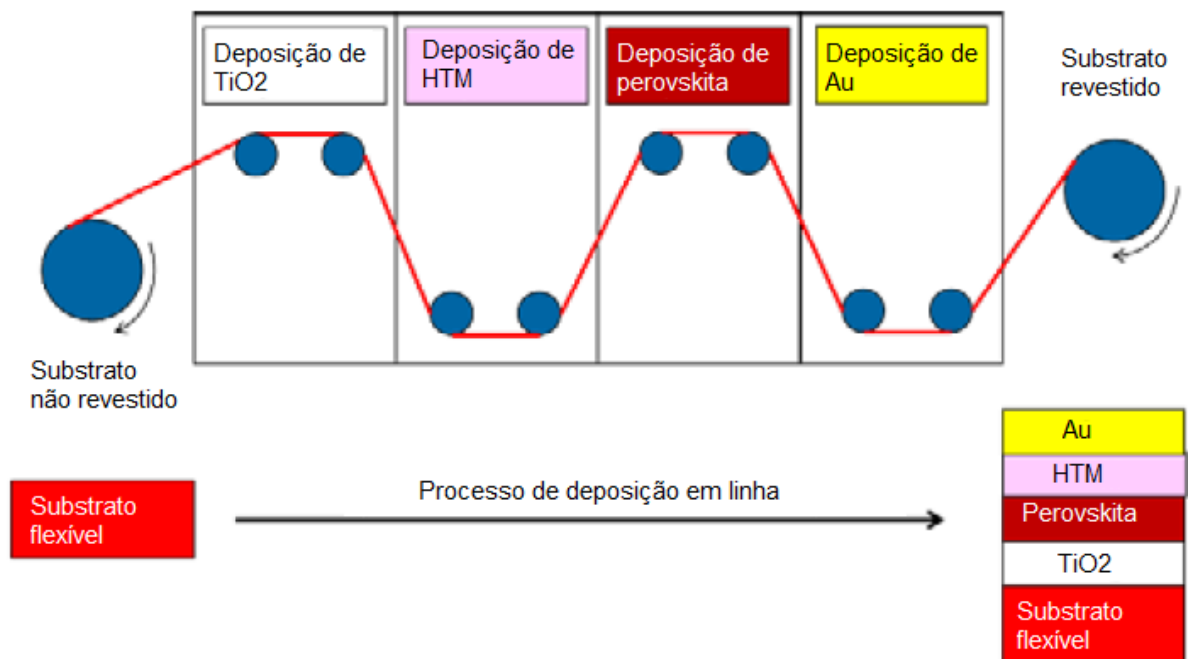


Figura 10 - Princípio de produção R2R de uma célula planar p-i-n de perovskita.

Fonte: Adaptado de CHARLES *et al.* (2016).

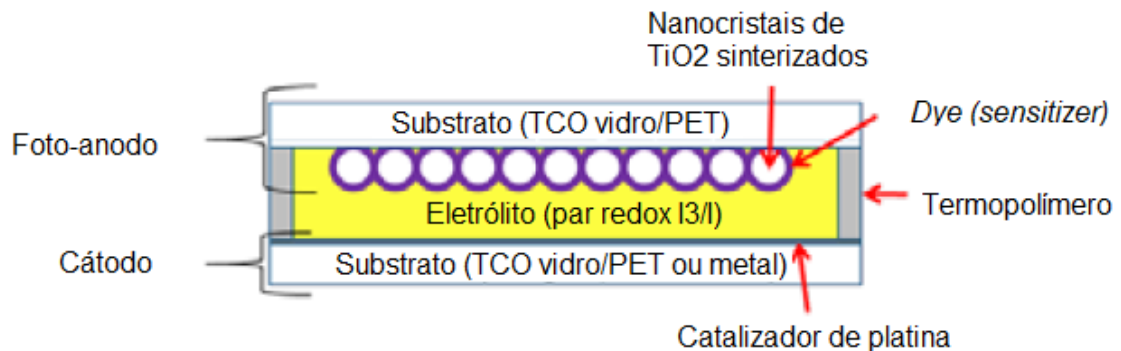
### 3.3.4 Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)

Existem inúmeras arquiteturas diferentes para as *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs), porém, geralmente estas são fabricadas com dois eletrodos, um foto-anodo e um contra eletrodo catódico. As DSSCs flexíveis são representadas pela Figura 11. Células de estado sólido não são representadas neste trabalho por ainda não serem comercializadas, porém são análogas às DSSCs líquidas, com o eletrólito substituído por um material de transporte de furo (HTM, *hole transport material*) sólido.

O foto-anodo é composto por um substrato revestido com uma camada mesoscópica de um semicondutor, comumente  $\text{TiO}_2$ , que é tingido com uma

espécie sensibilizadora capaz de absorver a luz visível. O contra-eletródo é composto por um segundo substrato de TCO revestido com uma camada catalítica de Pt [platina] ou por um substrato metálico como o Ti [titânio]. Os eletrodos são selados com um termopolímero e a cavidade entre eles é preenchida com um eletrólito iodo/triodeto ou par redox à base de cobalto. Quando iluminado, a absorção de um fóton pela espécie de corante cria um *exciton* (par elétron-buraco). Segue-se a injeção rápida do elétron do corante na banda de condução do titânio, permitindo que o elétron se difunda através do TCO do ânodo, em torno de um circuito e de volta ao contra-eletródo. O corante oxidado é reduzido pelo eletrólito, que é, por sua vez, reduzido na Pt do contraeletrodo.

(CHARLES *et al.*, 2016, p. 3)



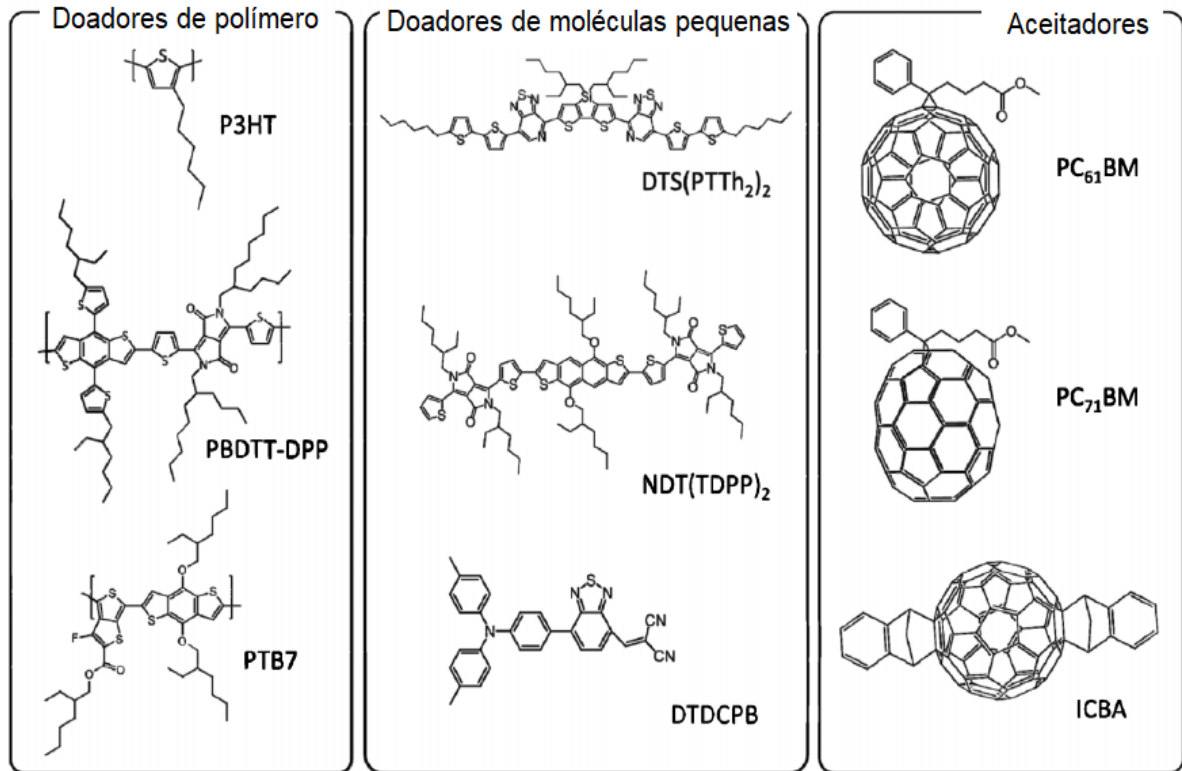
**Figura 11 - Dye-sensitized solar cell (DSSC – Grätzel Cell).**

Fonte: Adaptado de CHARLES *et al.* (2016).

### 3.3.5 Organic Photovoltaics (OPVs)

Sobre a arquitetura das OPVs, os materiais orgânicos são depositados como filmes finos individuais ou como uma mistura de polímero e filme único. “Na configuração padrão, um substrato transparente (vidro ou plástico) é revestido com um condutor transparente que serve como o ânodo” (DARLING *et al.*, 2013), enquanto o outro eletrodo, o cátodo opticamente reflexivo, encontra-se na outra extremidade. Entre os eletrodos estão os materiais orgânicos. O primeiro é geralmente um material polimérico, o material “doador”, como 3-hexilpolitiofeno (P3HT), absorvedor de luz. O segundo, funcionando como uma camada transportadora de elétrons (ETL), um material “aceitador”, normalmente é um composto de fulereno, como éster metil fenil-

C61-butírico (PCBM) (DARLING *et al.*, 2013; CHARLES *et al.*, 2016). Outros materiais podem ser usados como “doadores” e “receptores”, cujas estruturas químicas podem ser observadas na Figura 12.



**Figura 12 - Estruturas químicas de representações de moléculas como doadores de elétrons e aceitadores de elétrons.**

Fonte: Adaptado de DARLING *et al.* (2013).

As OPVs podem ser fabricadas usando uma configuração normal, invertida (mais compatíveis com processos R2R) ou “tandem”, “composta por várias camadas ativas com diferentes intervalos de banda para capturar uma fração maior do espectro solar” (DARLING *et al.*, 2013).

A Figura 13 ilustra a arquitetura de uma OPV de configuração invertida, com os materiais orgânicos depositos em filmes finos individuais.

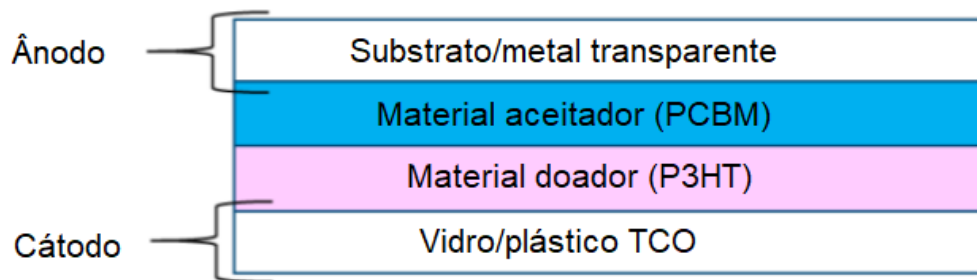


Figura 13 - Arquitetura de uma célula solar *Organic Photovoltaic* (OPV).

Fonte: Adaptado de CHARLES *et al.* (2016).

Conforme produtos de células solares OPV se expandem para outros mercados, pode haver economias na produção devido aos maiores volumes que podem ser produzidos. O processo de R2R pode ser essencial para o barateamento nos custos de produção. Em 2016, a maioria das aplicações de OPV se concentravam em carregadores móveis e portáteis para eletrônicos de consumo ou energia portátil, que se favorecem dos aspectos das OPV como flexibilidade, *design* personalizado e baixo peso (HENGEVOSS *et al.*, 2016).

A maior instalação de fotovoltaicas da terceira geração no mundo é a de filmes solares produzida pela empresa brasileira Sunew para a empresa brasileira Natura, em Cajamar, região metropolitana de São Paulo, com 1800 m<sup>2</sup> de painéis de fotovoltaicos orgânicos (OPV). Produzidos a partir de materiais orgânicos e recicláveis, foram instalados, em fevereiro de 2020, 1580 painéis que irão contribuir para evitar a emissão de 37 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais. Em um ano, o projeto chegará a 73,4 MWh de energia gerada, cerca de 40% superior a instalações de mesma potência com painéis solares de silício.

### 3.3.6 Perovskite Solar Cells (PSCs)

A célula de perovskita recebe este nome em honra ao mineralogista russo Lev Perovski, e se refere à estrutura de cristal de titanato de cálcio (CaTiO<sub>3</sub>) (SONG *et al.*, 2016).

As perovskitas são tipicamente formadas por um substrato de vidro revestido-TCO (*transparente conductive oxide*), o que compõe mais de 99% da massa de um dispositivo não encapsulado. O fotoabsorvente de perovskita é

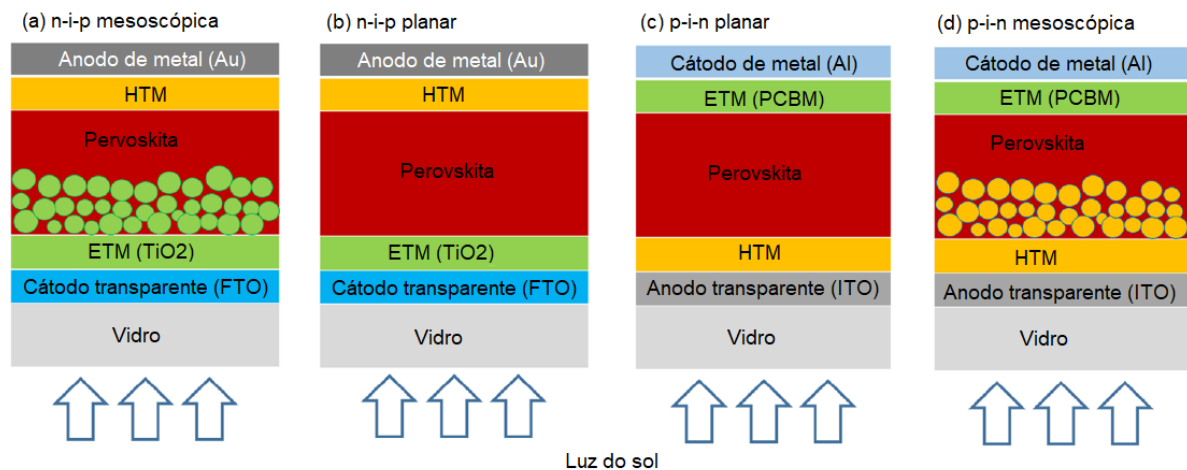


imprensado entre a camada de transporte de elétrons (ETL, *electron transport layer*) e a camada de transporte de buraco (HTL, *hole transport layer*). O ETL pode ser de natureza orgânica ou inorgânica e normalmente tem cerca de 100 nm de espessura. A espessura da camada de perovskita geralmente não excede 500 nm. Da mesma forma, os materiais de transporte de buraco (HTMs) podem ser orgânicos ou inorgânicos com espessuras semelhantes às da perovskita e do ETL. As células são completadas com um contra-eletrodo; os PSCs de melhor desempenho dependem de metais nobres (depositados por evaporação térmica), mas relatos de contraeletrodos de carbono não são incomuns. A espessura de toda a célula, excluindo o suporte de vidro, normalmente não excede 1 mm.

(KADRO *et al.*, 2017, p. 4)

As células de perovskita são baseadas em haleto de chumbo para o seu material ativo absorvedor, que representa menos de 0,5% de sua massa (quando usado um substrato de vidro). Células de perovskita que não utilizam chumbo em sua composição foram relatadas, mas não possuem eficiência comparável às mais usualmente utilizadas. Como a espessura do material absorvedor não ultrapassa 500 nm, a quantidade de chumbo encontrada na arquitetura de células de perovskita é relativamente pequeno, menor que 1g por metro quadrado (KADRO *et al.*, 2017).

Existem quatro estruturas de arquitetura dos dispositivos de fotovoltaicas de perovskita. A original é a estrutura mesoscópica n-i-p, que é usada para “aumentar a coleta de carga, diminuindo a distância de transporte do portador, evitando o vazamento de corrente contínua entre os dois contatos seletivos e aumentando a absorção de fótons devido ao espalhamento de luz” (SONG *et al.*, 2016). Estas mostraram eficiência de 20,2%. A estrutura planar n-i-p é uma evolução da estrutura mesoscópica, com eficiência de 19,3%. A estrutura invertida p-i-n mostrou eficiência de 18,9%, para a planar e 17,3% para a mesoscópica. Uma representação das quatro estruturas é exposta na Figura 14.



**Figura 14 - Diagramas esquemáticos de células solares de perovskita nas estruturas (a) n-i-p mesoscópica, (b) n-i-p planar, (c) p-i-n planar e (d) p-i-n mesoscópica.**

Fonte: Adaptado de SONG et al. (2016).

Os materiais de absorção das PSCs são abundantes e baratos, de composição com base em halogenetos de chumbo, que apresenta vantagens para a sua fabricação, o que difere da escassez de materiais encontrada no caso da segunda geração de PV, porém pode exigir considerações especiais para o seu tratamento de fim de vida. Devido à solubilidade do absorvedor, podem ser fabricados por meio de impressão a jato de tinta, possibilitando diferentes tipo de arquitetura.

Para o caso das PSCs, a recuperação exaustiva de resíduos de fim de vida e sua reciclagem podem não ser economicamente viáveis, a menos que exista um fornecimento grande e estável de resíduos.

### 3.3.7 Painéis Solares Integrados à Construção (BIPV)

Para atingir as metas europeias de eficiência energética, novas tecnologias de fotovoltaicas deverão melhorar sua performance no setor de construções. Os Painéis Solares Integrados à Construção (BIPV, *Building-Integrated Photovoltaics*) podem ter “funções de envelope”, substituindo elementos da construção como janelas, ladrilhos, telhas e cortinas, sendo que as tecnologias de filme fino da segunda e terceira geração têm vantagens, aqui, devido à flexibilidade, transparência, menor peso e menor custo de instalação (CHATZISIDERIS *et al.*, 2016).

As tecnologias mais utilizadas como BIPV e como Janelas Fotovoltaicas Semitransparentes Integradas (WISPV, *Window Integrated Semi-Transparent Photovoltaics*) são as de filme fino de silício amorfo (a-Si), policristalino ou monocristalino, DSSCs e células solares de polímero, tendo se tornado mais viáveis por serem uma tecnologia barata, flexível e semitransparente (LEE *et al.*, 2014). Painéis CIGS, da segunda geração, também são utilizados como BIPV forma de telhas (DARLING *et al.*, 2013). Módulos de OPV integrados em vidro passaram em testes rigorosos e se qualificaram para aplicações em construções e estruturas arquitetônicas, como fachadas (HENGEVOSS *et al.*, 2016).

Módulos OPV integrados em vidro arquitetônico foram mostrados para passar em testes de envelhecimento acelerado muito rigorosos e se qualificam para aplicações de construção. Fotovoltaicos integrados de edifícios (BIPV) referem-se à integração de OPV em estruturas arquitetônicas, como fachadas.

Com o uso de painéis solares de filme fino semitransparentes em janelas, pode-se gerar energia elétrica que ajude a compensar as cargas de aquecimento, resfriamento e iluminação de uma construção. Em um estudo realizado com o programa de simulação ESP-r 11.1, para avaliar critérios de sistemas integrados em construções, faz-se um estudo utilizando a tecnologia de PV DSSC. Como resultado, para as cidades em que se utiliza mais o resfriamento (uso de ar condicionado), como Miami, São Paulo e Sydney, a face norte, para o hemisfério Norte – e a face sul, para o hemisfério Sul – é a mais eficiente para que as janelas com painéis fotovoltaicos sejam instaladas para economia de energia. Já para cidades cujas construções utilizam tanto o sistema de resfriamento quanto o de aquecimento de uma maneira similar, como Nova York, Seul, Berlim e Moscou, a carga total de energia pode ser reduzida instalando-se as janelas para a face sul (LEE *et al.*, 2014).

### 3.3.8 A Diretiva Europeia *Waste Electrical and Electronic Equipment* (WEEE) e o Projeto H2020 CABRISS

A Diretiva reformulada 2012/19/EU de 2012 para a gestão Resíduos dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE, *Waste Electrical and Electronic Equipment*) fornece um “quadro legislativo para a responsabilidade alargada do produtor de módulos fotovoltaicos à escala europeia” (BRENNER *et al.*, 2017).

Para os fabricantes de painéis fotovoltaicos, as suas principais responsabilidades, de acordo com a WEEE, são as seguintes:

- Fazer um relatório com o registro anual dos módulos colocados no mercado nacional.
- Organizar e financiar a recolha e gestão dos resíduos dos módulos.
- Atingir metas de coleta e reciclagem.
- Informar indústrias de tratamento de resíduos sobre sua composição, incluindo o possível uso de materiais perigosos.
- Informar os clientes finais sobre o descarte correto dos módulos de fim de vida.

As empresas fabricantes tomarem responsabilidade sobre a recolha pode ser custoso e reduzir as margens de ganho. Indo ao encontro de soluções para este problema, o projeto H2020 CABRISS (*implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver*, em português como “implementação de uma economia circular baseada em índio, silício e prata reciclados, reutilizados e recuperados”) busca o desenvolvimento de tecnologias capazes de reciclar maiores quantidades de resíduo de PV reduzindo os gastos operacionais (BRENNER *et al.*, 2017).

O programa Horizonte 2020 (H2020) promove inovação e auxilia no intercâmbio entre pesquisa e mercado, sendo o maior projeto neste quesito na União Europeia. Em um horizonte de sete anos (entre 2014 e 2020) estão disponíveis cerca de 80 milhões de euros financiados pela EU para a realização de soluções que tornem a indústria europeia mais sustentável e competitiva. Para a energia sustentável, o financiamento foi de € 5,931 mil milhões (HORIZON 2020, 2014).

O projeto H2020 CABRISS é uma iniciativa conjunta de 16 empresas e institutos de pesquisa para o desenvolvimento de uma economia circular principalmente para as fotovoltaicas, mas também para a indústria de eletrônicos e de vidro. Consiste na implementação de “(i) tecnologias de reciclagem para recuperar In, Ag e Si para tecnologias fotovoltaicas sustentáveis e outras aplicações; (ii) um roteiro de processamento de células solares, que usará resíduos de Si para a produção econômica e de alto rendimento de células solares híbridas baseadas em Si e demonstrará a possibilidade de reutilização e reciclabilidade no final da vida útil dos principais materiais fotovoltaicos” (CABRISS, 2015).

Para o aproveitamento dos resíduos reciclados, o projeto associa diferentes setores:

- Metalurgia do pó de Si para a fabricação de substrato de baixo custo;
- A indústria fotovoltaica;
- A indústria da reciclagem (hidrometalurgia e pirometalurgia).

Os principais objetivos do CABRISS são: aumentar a coleta de resíduos fotovoltaicos de 40% (em 2013) para até 90% em toda a Europa; recuperar até 90% das matérias-primas de alto valor (silício, índio e prata) das células e painéis; estabelecer simbioses industriais entre diferentes setores; reduzir o custo de fabricação de células e painéis em até 25% utilizando-se de resíduos de Si reciclados; e promover o comprometimento tanto de cidadãos como indústria para uma nova economia sustentável (BRENNER *et al.*, 2018).

As atividades técnicas do projeto CABRISS são organizadas em cinco “*workpackages*” WPs:

**WP1:** Coleta e desmontagem de resíduos fotovoltaicos, extração de materiais – O objetivo geral do WP1 é desenvolver métodos inovadores de baixo custo para a extração de silício, índio e prata de diferentes fontes de resíduos fotovoltaicos a fim de constituir matéria-prima de materiais. Desde o início, o consórcio decidiu cooperar de forma proativa com instituições de padronização em nível nacional e europeu.

**WP2:** Purificação de silício recuperado em resíduos de PV – O principal objetivo do WP2 é desenvolver métodos para a purificação de matéria-prima de Si a partir de Si recuperado de *wafers* solares [...]. Nesta fase do projeto, o parceiro da CABRISS SINTEF (Noruega) está se concentrando no crescimento de lingotes multi-Si e Si monocristalino. Em geral, a sucata de Si pode consistir em: *wafers* quebrados, estruturas de células solares quebradas ou células solares que são extraídas de módulos solares em fim de vida. Em todos os casos, todas as camadas relacionadas à base de células solares não-Si (metalização, revestimento anti-reflexo, emissor, superfície traseira) devem ser decapadas antes de serem usadas para o crescimento de lingotes [...]. As propriedades de todos os materiais obtidos nos processos de extração e purificação são continuamente analisadas por vários métodos analíticos disponíveis no consórcio CABRISS.

**WP3:** Fabricação de *wafers* de silício usando materiais reciclados – serão desenvolvidos substratos à base de Si de processamento padrão e econômico a partir da matéria-prima de Si reciclada.

**WP4:** Fabricação de células solares de silício usando materiais reciclados – O objetivo geral deste pacote de trabalho é desenvolver habilidades, know-how e processos para produzir células de alta eficiência a partir de wafers de Si obtidos em um processo de reciclagem e usando metais reciclados.

**WP5:** Transformação de materiais reciclados em produtos utilizáveis – Um objetivo principal deste pacote de trabalho é desenvolver processos para o uso de materiais reciclados à base de Ag e In. A demonstração da qualidade dos materiais reciclados para fazer novos módulos fotovoltaicos será mostrada por meio de medições internas e externas em comparação com os módulos fotovoltaicos padrão.

(BRENNER *et al.*, 2017, p. 3-4)

O exemplo do projeto CABRISS da União Europeia para a coleta e tratamento de resíduos de fim de vida de fotovoltaicas é um passo em direção ao melhoramento da aplicação do modelo de Economia Circular na produção de fotovoltaicas, e pode padronizar processos de recuperação e reciclagem que podem abrir caminhos para que outros países também desenvolvam tecnologia necessária para tal.

## 4 CONCLUSÃO

Existem muitos desafios no desenvolvimento de tecnologias e políticas de gestão adequadas para a recuperação, reciclagem e reincorporação de resíduos de fotovoltaicas em larga escala, além do desafio na criação e expansão de novas gerações de fotovoltaicas que fogem das já consolidadas c-Si.

Com a pandemia do Covid-19, a demanda de energia deve cair 5% em 2020 e o investimento em energia deve cair 18%, de acordo com o *World Energy Outlook (WEO) 2020* da IEA. A perspectiva é a de uma rápida transição para energias limpas, com a energia solar como a principal fonte, sendo hoje mais barata do que novas usinas a carvão ou a gás em muitos países (IEA, 2020). Esta transição lança novos desafios para que a fabricação de painéis solares seja, também, de baixo impacto ambiental e econômico. Adicionalmente, este trabalho atenta-se para o desenvolvimento de novas pesquisas para a estabilidade e confiabilidade das redes elétricas, e para o projeto de novas linhas de transmissão e de distribuição que contemplem este cenário de transformação dos Sistemas Elétricos de Potência. Uma outra oportunidade para trabalhos futuros é uma análise de aspectos econômicos, com o levantamento de custos, sobre a implementação de um modelo econômico circular na fabricação de painéis fotovoltaicos de diferentes arquiteturas e tecnologias.

Algumas soluções já estão sendo propostas para possibilitar este cenário de energia limpa. Em seu *Sustainable Development Scenario (SDS, Cenário de Desenvolvimento Sustentável)*, a IEA, em cooperação com o Fundo Monetário Internacional, traz soluções para um novo cenário de energia limpa pós-crise, com um investimento adicional de US\$ 1 trilhão por ano entre 2021 e 2023, direcionados “para melhorias na eficiência, eletricidade e redes de energia de baixa emissão, e combustíveis mais sustentáveis” (IEA, 2020).

O cenário esperado de rápida transição para a energia solar aponta para um crescimento nos resíduos de fotovoltaicas, que, por um lado, pode ser uma oportunidade para abrir novos horizontes econômicos e de criação de valor na cadeia de produção, um objetivo que pode ser alcançado com a implementação de um modelo de Economia Circular de recuperação de materiais em fim de vida.

O presente estudo analisou as principais tecnologias de painéis fotovoltaicos no contexto da Economia Circular, definindo e caracterizando o conceito

de EC bem como sua relação com a produção de painéis, com a recuperação de resíduos em fim de vida para a sua reinserção no início de ciclo de vida das fotovoltaicas e de outros produtos.

As principais tecnologias de painéis fotovoltaicas, as de silício cristalino (c-Si), da primeira geração, as CIGS e CdTe, da segunda geração, e as DSSCs, OPVs e PSCs, da terceira geração, foram caracterizadas. Para o caso das PV de silício, este material semicondutor mostrou-se reciclável e reutilizável para a produção de novos painéis por meio de tratamento térmico e químico, apresentando eficiência similar à de painéis fabricados num modelo linear. O trabalho expôs os materiais utilizados na produção das tecnologias da segunda e terceira geração. A segunda geração requer o uso de materiais tóxicos como cádmio, índio e gálio para a sua fabricação. Já a terceira geração utiliza em sua composição, geralmente, um material de substrato de óxidos condutores transparentes (TCO), eletrodos e um encapsulante (EVA ou vidro).

Com otimização dos processos de fim de vida, as tecnologias da terceira geração de fotovoltaicas são atraentes para um futuro de energia sustentável. Com seus primeiros exemplos de aplicação comercial recentes, já demonstra ser uma opção economicamente e ambientalmente viável.

De acordo com a literatura, as pesquisas e documentos relatórios já existentes sobre a inserção de um modelo econômico circular na produção de painéis fotovoltaicos revelam que a aplicabilidade de conceitos da EC é possível para todas as gerações, porém, como a participação de mercado de produtos da terceira geração ainda é muito pequena, a recuperação e reciclagem de resíduos ainda não possui estudos significativos, mas a EC já pode ser aplicada na fase de desenvolvimento destas tecnologias. Esta relação da EC com as tecnologias PV pode ser feita por meio de um *design* apropriado de módulos fotovoltaicos, de uma conscientização do consumidor para a escolha de tecnologias limpas, e de responsabilização dos fabricantes para que haja recuperação de resíduos de fim de vida, além de um tratamento adequado destes resíduos.

A maior parte da produção de painéis fotovoltaicos atual, com um mercado ainda dominado pelas tecnologias da primeira geração, ainda está em um modelo econômico linear, ou seja, uma recuperação e tratamento adequados para resíduos de fim de vida ainda não abrange toda a produção e ainda há muito a ser feito sobre o desenvolvimento e expansão de novas tecnologias, o que acaba sendo inconsistente com um modelo de EC, porém abre espaço para que novas e atuais



pesquisas e projetos possam explorar ainda mais este campo. Este trabalho apresentou estudos que abordam o desenvolvimento de novas tecnologias que já incorporam um modelo circular de produção e também estudos sobre a reciclagem e reincorporação de materiais.

Este trabalho aponta para a necessidade de novas pesquisas que contribuam para a criação de políticas de gestão de resíduos, do monitoramento de dados sobre estes resíduos e em métodos para a diminuição de custos no seu tratamento, além da exploração da escalabilidade de novas tecnologias de células e painéis solares.

## REFERÊNCIAS

ABOUT. **CABRISS**, 2015. Disponível em: <<https://www.spire2030.eu/cabriss>>. Acesso em: Outubro de 2020.

BRENNER, Werner; ADAMOVIC, Nadja. A circular economy for photovoltaic waste—the vision of the European project CABRISS. Em: **2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)**. IEEE, 2017. p. 146-151.

BRENNER, Werner; ADAMOVIC, Nadja. Standardization as a tool for promoting innovation and commercialization of a circular economy for PV waste—The example of the European H2020 project CABRISS. Em: **2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)**. IEEE, 2018. p. 0122-0127.

CHARLES, Rhys G.; DAVIES, Matthew L.; DOUGLAS, Peter. Third generation photovoltaics—Early intervention for circular economy and a sustainable future. Em: **2016 Electronics Goes Green 2016+(EGG)**. IEEE, 2016. p. 1-8.

CHATZISIDERIS, Marios D. et al. Ecodesign perspectives of thin-film photovoltaic technologies: A review of life cycle assessment studies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 2-10, 2016.

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

DARLING, Seth B.; YOU, Fengqi. The case for organic photovoltaics. **Rsc Advances**, v. 3, n. 39, p. 17633-17648, 2013.

DUBEY, Swapnil; JADHAV, Nilesh Y.; ZAKIROVA, Betka. Socio-economic and environmental impacts of silicon based photovoltaic (PV) technologies. **Energy Procedia**, v. 33, p. 322-334, 2013.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **What is a circular economy?** Reino Unido, 2017. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>>. Acesso em: Novembro de 2020.

GAUSTAD, Gabrielle et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 24-33, 2018.

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

HENGEVOSS, Dirk et al. Life Cycle Assessment and eco-efficiency of prospective, flexible, tandem organic photovoltaic module. **Solar Energy**, v. 137, p. 317-327, 2016.

HORIZON 2020. **HORIZON 2020 em breves palavras**. Luxemburgo, 2014. Disponível em: <<https://www.fapema.br/wp-content/uploads/2018/06/Brochure-H2020-Brasil.pdf>>. Acesso em: Outubro de 2020.

IEA - International Energy Agency. Electricity information: **Overview 2018**, 2018.

IEA - International Energy Agency. **World Energy Outlook 2019 - Electricity**, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/electricity>>. Acesso em: Setembro de 2020.

KADRO, Jeannette M.; HAGFELDT, Anders. The end-of-life of perovskite PV. **Joule**, v. 1, n. 1, p. 29-46, 2017.

KALMYKOVA, Yuliya; SADAGOPAN, Madumita; ROSADO, Leonardo. Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 190-201, 2017.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa; KUCZYŃSKA-ŁAŻEWSKA, Anna. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production—A life cycle assessment of environmental impacts. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 205, p. 110259, 2020.

LEE, Jae Wook; PARK, Jiyoung; JUNG, Hyung-Jo. A feasibility study on a building's window system based on dye-sensitized solar cells. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 38-47, 2014.

LEITÃO, Alexandra. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**, v. 1, n. 2, 2015.

LUDIN, Norasikin Ahmad et al. Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 11-28, 2018.

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

MAHMOUDI, Sajjad et al. End-of-life photovoltaic modules: a systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 1-16, 2019.

NATURA RECEBE A MAIOR INSTALAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES DO MUNDO. **Natura Blog**, 2020. Disponível em: <<https://www.natura.com.br/blog/sustentabilidade/natura-recebe-a-maior-instalacao-de-paineis-solares-do-mundo>>. Acesso em: Outubro de 2020.

OCDE - L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques. À propos. Paris.

PAYET, Jérôme; GREFFE, Titouan. Life Cycle Assessment of New High Concentration Photovoltaic (HCPV) Modules and Multi-Junction Cells. **Energies**, v. 12, n. 15, p. 2916, 2019.

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

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

SOLANGI, K. H. et al. A review on global solar energy policy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 4, p. 2149-2163, 2011.

SONG, Zhaoning et al. Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. **Journal of Photonics for Energy**, v. 6, n. 2, p. 022001, 2016.

TSOUTSOS, Theocharis; FRANTZESKAKI, Niki; GEKAS, Vassilis. Environmental impacts from the solar energy technologies. **Energy policy**, v. 33, n. 3, p. 289-296, 2005.

UNION, Europäische. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. **Official Journal of the European Union**, v. 5, p. 2009, 2009.

VILELA, Lílian Oliveira. Aplicação do proknow-c para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 1, 2012.

## APÊNDICE A – PORTFÓLIO FINAL

**Quadro 2 - Portfólio final.**

<b>Nº</b>	<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>
1	<i>A circular economy for Photovoltaic waste - the vision of the European project CABRISS</i>	Brenner <i>et al.</i>	2017
2	<i>A feasibility study on a building's window system based on dye-sensitized solar cells</i>	Lee <i>et al.</i>	2014
3	<i>Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues</i>	Gaustad <i>et al.</i>	2017
4	<i>Ecodesign perspectives of thin-film photovoltaic technologies: A review of life cycle assessment studies</i>	Chatzisideris <i>et al.</i>	2016
5	<i>End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review</i>	Mahmoudi <i>et al.</i>	2019
6	<i>Life Cycle Assessment and eco-efficiency of prospective, flexible, tandem organic photovoltaic module</i>	Hengevoss <i>et al.</i>	2016
7	<i>Life Cycle Assessment of New High Concentration Photovoltaic (HCPV) Modules and Multi-Junction Cells</i>	Payet <i>et al.</i>	2019
8	<i>Pathways toward high-performance perovskite solar cells: Review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications</i>	Song <i>et al.</i>	2016
9	<i>Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review</i>	Ludin <i>et al.</i>	2018
10	<i>Socio-economic and environmental impacts of silicon based photovoltaic (PV) technologies</i>	Dubey <i>et al.</i>	2013
11	<i>Standardization as a tool for promoting innovation and commercialization of a circular economy for PV waste — The example of the European H2020 project CABRISS</i>	Brenner <i>et al.</i>	2018
12	<i>The case for organic photovoltaics</i>	Darling <i>et al.</i>	2013
13	<i>The End-of-Life of Perovskite PV</i>	Kadro <i>et al.</i>	2017
14	<i>The use of recycled semiconductor material in crystalline silicone photovoltaic modules production – A life cycle assessment of environmental impacts</i>	Klugmann-Radziemska <i>et al.</i>	2020
15	<i>Third generation photovoltaics-Early intervention for circular economy and a sustainable future</i>	Charles <i>et al.</i>	2016

Fonte: Autoria própria.

## APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONTEÚDO

**Quadro 3 - Análise de Conteúdo.**

Nº	Autor	Ano	Contribuições
1	Brenner <i>et al.</i>	2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quadro legislativo para a aplicação de um modelo de Economia Circular na recuperação e reutilização de índio, silício e prata dos resíduos fotovoltaicas pelo projeto europeu CABRISS.</li> <li>• Responsabilidades dos fabricantes de fotovoltaicas de acordo com a Diretiva dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) de 2012.</li> </ul>
2	Lee <i>et al.</i>	2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As tecnologias de filme fino da segunda e terceira geração para a integração em construções como Janelas Fotovoltaicas Semitransparentes Integradas (WISPV).</li> </ul>
3	Gaustad <i>et al.</i>	2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participação dos custos do cádmio e do telúrio para os custos totais da fabricação de painéis de telureto de cádmio (CdTe), da segunda geração de fotovoltaicas.</li> </ul>
4	Chatzisideris <i>et al.</i>	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os Painéis Solares Integrados à Construção (BIPV) podem ter funções de envelope e substituir elementos da construção como janelas e telhas.</li> </ul>
5	Mahmoudi <i>et al.</i>	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de uma gestão estratégica de resíduos de fim de vida e sua utilização em outras indústrias (cimento, tijolo, baterias).</li> </ul>
6	Hengevoss <i>et al.</i>	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações de OPVs em carregadores portáteis e sua qualificação para aplicações arquitetônicas.</li> </ul>
7	Payet <i>et al.</i>	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão de gases de efeito estufa devido à geração de energia elétrica. Viabilidade de sistemas fotovoltaicos de alta concentração (HCPV).</li> </ul>
8	Song <i>et al.</i>	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas de células solares de perovskita, sendo a original n-i-p mesoscópica, e as demais n-i-p planar, p-i-n planar e p-i-n mesoscópica.</li> </ul>
9	Ludin <i>et al.</i>	2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise de ciclo de vida de módulos de silício, onde o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) é reduzido para silício de grau metalúrgico (MG-Si) para ser purificado em silício de grau solar.</li> </ul>
10	Dubey <i>et al.</i>	2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impactos ambientais ligados à produção de fotovoltaicas. Produção de painéis fotovoltaicos e sua relação com outras indústrias tradicionais.</li> </ul>
11	Brenner <i>et al.</i>	2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de resíduos de silício para a produção de novas células.</li> <li>• Apresentação do projeto europeu CABRISS para implementação de uma Economia Circular, que demonstra a reciclabilidade de materiais fotovoltaicos em fim de vida e sua associação com outros setores.</li> </ul>

12	Darling <i>et al.</i>	2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arquitetura das células solares orgânicas (OPVs). Representação de estruturas de moléculas para materiais "doadores" e "aceitadores".</li> </ul>
13	Kadro <i>et al.</i>	2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arquitetura, composição e fim de vida das células de perovskita.</li> <li>• Projeção do percentual de resíduos fotovoltaicos dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) para o ano de 2050.</li> </ul>
14	Klugmann-Radziemska <i>et al.</i>	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise de ciclo de vida dos componentes de painéis fotovoltaicos de silício.</li> <li>• Estudo sobre a reciclagem dos produtos residuais.</li> <li>• Impacto ambiental da recuperação e reciclagem do silício.</li> </ul>
15	Charles <i>et al.</i>	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vantagens da otimização do ciclo de vida para as tecnologias da terceira geração de fotovoltaicas.</li> <li>• Arquitetura dos módulos fotovoltaicos DSSCs, OPVs e PSCs. Método de fabricação <i>Roll-to-Roll</i> (R2R).</li> </ul>

Fonte: Autoria própria.