



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Júlio Agostinho Dingna

**ANÁLISE DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE PROCESSOS DE  
RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO**

Araranguá-SC

2024

Júlio Agostinho Dingna

**ANÁLISE DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE PROCESSOS DE  
RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.

Araranguá-SC

2024

Dingna, Júlio Agostinho

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE PROCESSOS DE RECICLAGEM DE  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS / Júlio Agostinho Dingna ;  
orientadora, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, 2024.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Avaliação de Ciclo de Vida,  
Módulos Fotovoltaicos. I. Madruga, Kátia Cilene Rodrigues.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Energia. III. Título.

Júlio Agostinho Dingna

**ANÁLISE DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE PROCESSOS DE  
RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

-  
Prof.<sup>a</sup> Carla De Abreu D'aquino, Dra.  
Coordenadora do Curso

Prof.<sup>a</sup> Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.  
Orientadora

Prof. Giuliano Rampinelli, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Luiz Fernando Belchior Ribeiro, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

---

-  
Prof.<sup>a</sup> Carla De Abreu D'aquino, Dra.  
Coordenadora do Curso

---

Prof.<sup>a</sup> Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.  
Orientadora

---

Júlio Agostinho Dingna  
Autor

-  
Araranguá, 29 de novembro de 2024.

## AGRADECIMENTOS

Ao governo brasileiro pela oportunidade de cursar um ensino superior público, gratuito e de qualidade.

Ao meu tio Júlio Tchongo na Fimade (*in memoriam*), por acreditar em mim.

Ao Paulo Tchudá por ser um tio exemplar e incentivador e por todo apoio prático que me deu.

À família Fraga na pessoa da Mariene pelo carinho e acolhimento que deram durante os meus primeiros anos no Brasil.

Ao Francisco Alves Junior e Sun por me hospedar durante os primeiros anos em Santa Catarina e por toda ajuda prática que me deu.

Às assistentes sociais da UFSC Araranguá por brigar junto comigo durante dois anos para restituição do direito a assistência estudantil.

Aos servidores e funcionários da limpeza, da segurança e motoristas da UFSC Araranguá por seu bom trabalho e conversas trocadas durante os anos que passei no campus.

À Carolina Coimbra, uma advogada de coração enorme, pela assistência jurídica no momento mais complicado da minha trajetória acadêmica e por sua linda amizade.

À Zenaide, Otávio, Vanessa e Aline (*in memoriam*) pela carinhosa acolhida e amizade que me proporcionaram.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação.

## RESUMO

A geração fotovoltaica cresceu muito nos últimos anos. Prevê-se alto volume desses equipamentos que chegarão ao fim de vida útil nos próximos anos. A ferramenta Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem sido aplicada para avaliar os impactos ambientais desses equipamentos – desde a sua produção até a disposição final. Porém, devido à falta de dados e de indústrias insipientes de reciclagem desses equipamentos a grande maioria desses estudos não avaliaram o impacto ambiental dos processos de reciclagem. O objetivo desta investigação foi identificar e analisar estudos de ACV de processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Para tanto, o estudo foi dividido em três etapas que foram: 1) referencial teórico das temáticas do estudo; 2) identificação dos trabalhos sobre processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos e 3) análise de estudos de ACV de reciclagem de painéis solares em plantas industriais. Os resultados são os estudos de Ansanelli *et al* e de Latunussa *et al* sobre ACV de processos de reciclagem praticados por duas plantas na Itália: ReSiELP e FRELP, respectivamente. Após a análise desses estudos, entre as conclusões, destaca-se: i) a necessidade de que os processos de recuperação de materiais como Si, Cu e Ag exigem técnicas mais complexas, porém, possuem impactos ambientais relativamente baixas; ii) a percepção de que transporte de módulos fotovoltaicos é um fator crítico que deve ser bem avaliado e detalhado num estudo de ACV de reciclagem de painéis solares; iii) a necessidade de estudar e adotar técnicas de tratamento térmico mais eficientes e iv) a percepção de que num estudo desse a unidade funcional baseada no parâmetro massa é prático e fundamental para comparação de diferentes estudos de ACV de reciclagem de módulos fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Avaliação de Ciclo de Vida. Painel Solar. Reciclagem de Painel Solar. Avaliação de processos de reciclagem de painel solar.

## **ABSTRACT**

Photovoltaic generation has grown significantly in recent years. A high volume of these systems is expected to reach the end of their useful life in the coming years. The Life Cycle Assessment (LCA) tool has been applied to evaluate the environmental impacts of these systems—from production to final disposal. However, due to the lack of data and the emerging nature of recycling industries for these systems, the majority of these studies have not assessed the environmental impact of recycling processes. The objective of this investigation was to identify and analyze LCA studies on photovoltaic module recycling processes. For this purpose, the study was divided into three stages: 1) theoretical framework on the study themes; 2) identification of research on photovoltaic module recycling processes; and 3) analysis of LCA studies on the recycling of solar panels in industrial plants. The results include the studies by Ansanelli et al. and Latunussa et al. on LCA of recycling processes carried out by two plants in Italy: ReSiELP and FRELP, respectively. Following the analysis of these studies, the conclusions highlight: i) the need for material recovery processes, such as for Si, Cu, and Ag, which require more complex techniques but have relatively low environmental impacts; ii) the realization that the transportation of photovoltaic modules is a critical factor that must be well evaluated and detailed in an LCA study on solar panel recycling; iii) the need to study and adopt more efficient thermal treatment techniques; and iv) the understanding that, in such a study, the functional unit based on the mass parameter is practical and fundamental for comparing different LCA studies on photovoltaic module recycling.

**Keywords:** Life Cycle Assessment of photovoltaic panel. Photovoltaic module recycling. LCA of photovoltaic panel recycling.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.1 - Capacidade instalada mundial de energia elétrica -----   | 21 |
| Figura 4.2 - Geração distribuída no Brasil-----   | 22 |
| Figura 4.3 - De célula a gerador fotovoltaico: (a) Célula fotovoltaica, (b) Módulo<br>fotovoltaico e (c) Conjunto de módulos fotovoltaicos----- | 23 |
| Figura 4.4 - Tecnologias de módulos fotovoltaicos -----   | 23 |
| Figura 4.5 - Componentes das camadas de um módulo de silício cristalino -----   | 24 |
| Figura 4.6 - Módulos fotovoltaicos de 3ª geração-----   | 25 |
| Figura 4.7 - Projeção de acúmulo de módulos fotovoltaicos -----   | 26 |
| Figura 4.8 - Métodos de delaminação e separação de módulos fotovoltaicos c-Si --  | 29 |
| Figura 4.9 - Fases do estudo de ACV -----   | 34 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 4.1 - Tabela 2 – Composição de massa painéis fotovoltaicos | 20 |
| Quadro 4.2 - Métodos de ACV e suas abrangências                   | 30 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Espectro eletromagnético e energia de fóton associada                            | 19 |
| Tabela 4.2 - Percentual de redução dos impactos ambientais alcançados pelo caso da reciclagem | 37 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                      |
| ACV     | Avaliação de Ciclo de Vida  |
| a-Si    | Silício amorfo  |
| CdTe    | Telureto de Cádmio  |
| CIGS    | <i>Copper-Indium-Gallium-Selenium</i> (Disseleneto de Cu, I e Ga)             |
| CIS     | <i>Copper-Indium-Selenium</i> (Disseleneto de Cobre e Índio)                  |
| CPV     | <i>Concentrator photovoltaics</i>   |
| DSSC    | <i>Dry-sensitised solar cell</i>  |
| EIA     | <i>Energy Information Administration</i>                                      |
| EVA     | Etileno Acetato de Vinila   |
| FRELP   | <i>Full Recycling End-of-Life Procedure</i>                                   |
| FV      | Fotovoltaico  |
| GaAs    | Arseneto de Gálio   |
| IBICT   | Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia                    |
| IRENA   | <i>International Renewable Energy Agency</i>                                  |
| ISO     | <i>International organization for Standardization</i>                         |
| LGRF    | <i>Laminated Glass Recycling Facility</i>                                     |
| m-Si    | Silício monocristalino  |
| NBR     | Norma Brasileira  |
| ONU     | Organização das nações unidas   |
| PDE     | Programa de Decenal de Expansão de Energia                                    |
| p-Si    | Silício policristalino  |
| PVC     | <i>Polyvinyl Chloride</i>   |
| PVF     | <i>Polyvinyl Fluoride</i>   |
| REPA    | <i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>                            |
| ReSiELP | <i>Recovery of Silicon and other materials from the End-of-Life PV Panels</i> |
| WEEE    | <i>Waste from Electrical and Electronic Equipment</i>                         |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $c$       | Velocidade da luz [ $3 \times 10^8$ m/s)          |
| $E_F$     | Energia emitida por um fóton [J] [eV]             |
| eV        | Elétron-Volt                                      |
| GW        | Gigawatts   |
| $h$       | Constante de Planck [ $6,63 \times 10^{-34}$ J.s] |
| kg        | Quilograma  |
| kW        | Quilowatts  |
| kWh       | Quilowatts-hora                                   |
| m/s       | Metros por segundo                                |
| RF        | Radiofrequência                                   |
| t         | Tonelada ou tempo                                 |
| $\lambda$ | Comprimento de onda                               |
| $\pi$     | Número pi   |

## SUMÁRIO

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | INTRODUÇÃO .....  | 13 |
| 2      | OBJETIVOS .....   | 15 |
| 2.1    | Objetivo Geral .....  | 15 |
| 2.2    | Objetivos Específicos:.....   | 15 |
| 3      | METODOLOGIA .....   | 16 |
| 3.1    | Desenvolvimento do Referencial Teórico.....                         | 16 |
| 3.2    | Identificação de Estudos de ACV de reciclagem de módulos FV .....   | 16 |
| 3.3    | Análise dos estudos .....   | 17 |
| 4      | REFERENCIAL TEÓRICO .....   | 17 |
| 4.1    | Conversão fotovoltaica.....   | 17 |
| 4.2    | Panorama de energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo .....   | 20 |
| 4.3    | Tecnologias de módulos fotovoltaicos .....                          | 22 |
| 4.3.1. | Módulos fotovoltaicos de 1ª geração .....                           | 23 |
| 4.3.2. | Módulos fotovoltaicos de 2ª geração .....                           | 25 |
| 4.3.3. | Módulos fotovoltaicos de 3ª geração .....                           | 25 |
| 4.4    | Tecnologias de gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos ..... | 26 |
| 4.5    | Avaliação do Ciclo de Vida .....                                    | 29 |
| 4.5.1. | História de ACV .....   | 30 |
| 4.5.2. | Etapas de ACV .....   | 33 |
| 4.5.3. | Categorias de Impacto Ambiental .....                               | 35 |
| 4.5.4. | Níveis de Avaliação de Impacto Ambiental .....                      | 36 |
| 4.5.5. | Métodos de Avaliação de Ciclo de Vida.....                          | 37 |
| 4.5.6. | Bancos de dados de ACV .....  | 38 |
| 4.5.7. | Softwares para ACV .....  | 39 |
| 5      | RESULTADOS E ANÁLISES .....   | 40 |
| 5.1    | ACV de processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos.....         | 43 |
| 5.1.1. | Processo ReSiELP .....  | 43 |
| 5.1.2. | Processo <i>FRELP</i> .....   | 47 |
| 5.3.   | Análise dos resultados .....  | 50 |
| 6      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 53 |
|        | REFERÊNCIAS.....  | 55 |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Primeira Revolução Industrial, nos séculos XVIII e XIX, o sistema produtivo industrial caracterizou-se pelo aumento da substituição da energia humana e animal por instrumentos mecânicos (Landes, 1969, *apud* Dathein, 2003). A partir da segunda metade do século XIX, iniciou-se o que hoje é denominada de Segunda Revolução Industrial. Enquanto a Primeira foi marcada pelas máquinas a vapor e pelo uso de carvão, a Segunda baseou-se na eletricidade e no uso de petróleo (Dathein, 2003).

Essas revoluções industriais trouxeram, como um de seus desdobramentos mais visíveis, o crescimento vertiginoso da demanda por energia e, conseqüentemente, um aumento na exploração de recursos energéticos fósseis – principalmente carvão e petróleo. As revoluções tecnológicas subsequentes, combinadas com o crescimento demográfico mundial, aceleraram ainda mais esse processo. No entanto, não demorou para que surgisse a percepção de que essas fontes energéticas são finitas e que sua exploração gera impactos adversos e irreversíveis ao meio ambiente (Landes, 2003).

Na literatura, há muitas definições para a expressão “desenvolvimento sustentável”. Todas elas destacam um ou mais aspectos desse conceito. A definição mais abrangente e amplamente aceita é a fornecida pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU, em 1987, no lançamento do documento *Nosso Futuro Comum*, também conhecido como Relatório Brundtland, segundo a qual:

“O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades.” (Nosso Futuro Comum, 1987, p. 9)

Nesse contexto, nas últimas décadas, tem ocorrido um crescimento das fontes renováveis de geração de eletricidade na matriz elétrica mundial. Dentre essas fontes, a geração fotovoltaica é a que mais tem crescido. A previsão para o crescimento da geração fotovoltaica até 2030 é bastante promissora. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia solar fotovoltaica deve ser responsável por 80% do crescimento da capacidade renovável global até o final da década. Isso se deve tanto à construção de grandes usinas solares quanto ao aumento das

instalações solares em telhados de empresas e residências (EIA, 2024).

Os módulos fotovoltaicos são projetados para gerar energia por 25 a 30 anos, período durante o qual poderão perder de 6% a 20% de sua eficiência (ISIDRO, [ano]). Isso significa que o crescimento do setor fotovoltaico intensificará a geração de grandes volumes de resíduos num futuro não muito distante. No entanto, esse aumento traz sérias preocupações quanto à destinação dos componentes dos geradores fotovoltaicos ao final de sua vida útil. De acordo com um estudo realizado em Portugal, o sistema de geração fotovoltaica é o que mais impacto ambiental possui quando comparado a sistemas hidrelétricos e eólicos, considerando o ciclo de vida completo (MARQUES et al., 2018). Portanto, é fundamental traçar planos, tanto no âmbito governamental quanto industrial, para lidar com os grandes volumes de módulos fotovoltaicos que chegarão ao fim de sua vida útil nos próximos anos.

Existem diversos manejos desse resíduo sólido praticados ao redor do mundo, que vão desde o simples descarte até técnicas mais avançadas de reciclagem. Esses processos de reciclagem têm sido estudados através de Avaliação de Ciclo de Vida para dimensionar seus potenciais impactos e, assim, identificar medidas que possam minimizá-los. Porém, há uma lacuna desses estudos na literatura científica (Maani, 2024).

Considerando o exposto acima, apresenta-se na próxima seção o objetivo deste trabalho.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar e realizar uma análise comparativa de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desenvolver um referencial teórico abrangente sobre as temáticas relacionadas ao estudo.
- Identificar estudos de ACV aplicados a processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino no fim da vida útil.
- Analisar os estudos de ACV que abordam os processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino no fim de vida útil.

### 3 METODOLOGIA

Para atender aos objetivos propostos, foi realizado um estudo de caráter exploratório, com abordagem qualitativa. A investigação foi estruturada em três etapas, descritas a seguir.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta etapa, realizou-se uma pesquisa bibliográfica abrangente, incluindo artigos científicos, documentos públicos, normas técnicas e capítulos de livros. O objetivo foi embasar os conceitos do estudo, utilizando termos como “avaliação de ciclo de vida”, “painel solar”, “energia solar fotovoltaica”, “fim de vida de módulos fotovoltaicos” e “reciclagem de módulos fotovoltaicos”, bem como seus correspondentes em inglês: “life cycle assessment”, “solar panel”, “photovoltaic solar energy”, “end of life of photovoltaic modules” e “recycling photovoltaic modules”. Esses termos foram pesquisados em fontes nacionais e internacionais.

#### 3.2 IDENTIFICAÇÃO DE ESTUDOS DE ACV DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FV

Nesta etapa, a investigação concentrou-se na busca por trabalhos recentes que abordassem exclusivamente a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino no final de sua vida útil ou que detalhassem esses processos em estudos completos de ACV. Para tanto, utilizaram-se os seguintes termos de busca: “Avaliação de ciclo de vida de painéis solares”, “Avaliação de ciclo de vida de reciclagem de módulos fotovoltaicos” e seus correspondentes em inglês: “solar panel recycling life cycle assessment” e “life cycle assessment of photovoltaic module recycling”. A pesquisa foi restringida ao período dos últimos 10 anos, com prioridade para estudos de ACV mais recentes, e focou em processos de reciclagem com nível mínimo de maturidade tecnológica TRL6 e que operam no mesmo país. Primeiramente, foram identificadas duas plantas de reciclagem de módulos fotovoltaicos que estão na fase piloto localizadas na Itália. Em seguida, buscou-se identificar estudos de ACV dos processos de reciclagem operados nas duas plantas. Por fim, identificaram-se dois estudos e esses foram analisados e comparados. Por outro lado, os critérios de exclusão abrangeram artigos que, após leitura do título, resumo e palavras-chave, não apresentassem relação direta com o tema em estudo, e artigos resultados de investigação bibliográfica.

### 3.3 ANÁLISE DOS ESTUDOS

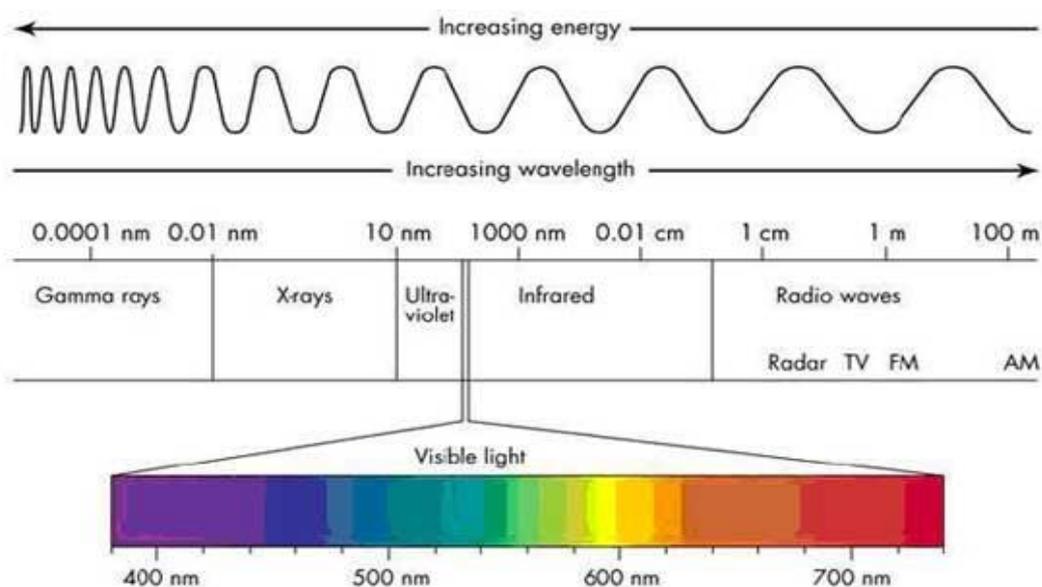
Nesta etapa, fez-se uma análise de cada etapa do estudo de ACV dos dois artigos e cruzou-se os dados a fim de comparar e destacar diferenças ou semelhanças que tiveram contribuições significativas nos resultados de impacto. Esses estudos foram avaliados a luz na NBR e da *ILCD Handbook*

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

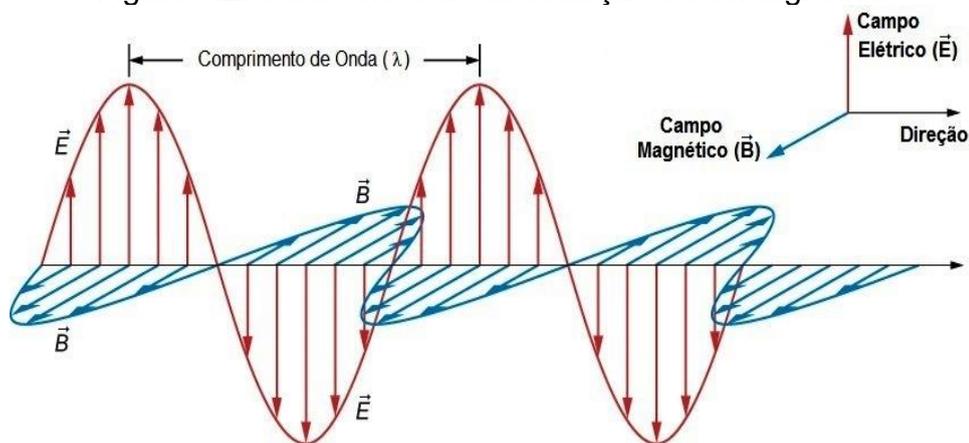
O Sol é responsável por 99,97% da energia presente no sistema Terra-atmosfera, transmitida na forma de radiação eletromagnética. Essa forma de energia não depende de matéria para sua transmissão, o que permite sua propagação pelo vácuo até alcançar a atmosfera terrestre. Ela é composta por ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos, cujo conjunto é denominado espectro eletromagnético Figura 4.1. Essas ondas são transversais, formadas por uma componente elétrica e outra magnética, que oscilam perpendicularmente entre si e à direção de propagação Figura 4.2 (Antonine Education).

Figura 4.1- Espectro eletromagnético



Fonte: Antonine Education

Figura 4.2: Características da radiação eletromagnética



Fonte: O Mundo da Química

A radiação solar que incide no topo da atmosfera terrestre passa por diversos fenômenos, como reflexões, dispersões e absorções, durante seu percurso até a superfície. A reflexão ocorre quando a radiação é total ou parcialmente refletida na interface entre dois meios diferentes, que, no caso da radiação solar, são o vácuo e os gases na camada superior da atmosfera. A fração da radiação refletida, denominada albedo, varia de acordo com as propriedades da radiação e da superfície envolvida. Aproximadamente 30% da energia solar que atinge a atmosfera é refletida de volta para o espaço. Além disso, cerca de 19% da radiação solar é absorvida pelos gases da atmosfera, sendo convertida em energia térmica sensível (Galfard, 2015).

“Se a humanidade fosse capaz, de uma forma ou de outra, de coletar toda energia que o sol emite num segundo, isso seria suficiente para suprir todas as necessidades de energia do mundo por cerca de meio bilhão a 1 bilhão de anos.” (Galfard, 2015)

Anualmente, cerca de  $1,5125 \times 10^{18}$  kWh dessa energia alcançam a atmosfera terrestre. Essa quantidade é extremamente elevada quando comparada ao consumo mundial de energia. Em 2021, por exemplo, segundo a EIA, o consumo global total foi de  $1,7682 \times 10^{14}$  kWh, representando apenas 0,00012% da energia solar que atinge o planeta (Fadigas, 2004; EIA, 2022).

Existem diversas formas de aproveitar a radiação luminosa do Sol. O calor gerado pela radiação pode ser utilizado, por exemplo, para aquecimento de água em

residências por meio de coletores solares ou para geração de eletricidade por concentradores solares, conhecidos como heliostatos. No entanto, uma das formas mais difundidas de aproveitamento da energia solar é a conversão direta de sua luz em eletricidade. Esse processo, conhecido como efeito fotovoltaico, é um fenômeno físico característico de determinados materiais semicondutores (Zilles, 2012).

“A palavra ‘fotovoltaico’ vem do grego *photos*, que significa luz, e de *Volta*, nome do físico italiano que, em 1800, descobriu a pilha elétrica.” (ZILLES, 2012)

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Em um experimento com uma célula eletrolítica e dois eletrodos, ele verificou que certos materiais, quando expostos à luz solar, geravam uma pequena corrente elétrica. Na física clássica, a luz, como radiação eletromagnética, é tratada como um fenômeno ondulatório. Entretanto, para compreender plenamente a interação entre a luz e a matéria, é necessário recorrer à teoria corpuscular da luz, desenvolvida pela Física Moderna, que introduz o conceito da natureza dual da luz. Essa teoria descreve a luz como descontínua, composta por partículas elementares denominadas fótons. Cada fóton representa o quantum de energia da radiação eletromagnética. (Zilles, 2012). A energia de um fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação eletromagnética, conforme expresso pela relação de Planck:

$$E_F = \frac{h \times c}{\lambda}$$

onde,

$E_F$  é a energia contida em um fóton medida em  $J$  (Joule) ou  $eV$  (elétron-Volt)

$h$  é a constante de Planck ( $h = 6,63 \times 10^{-34} J.s$ ), e

$c$  é a velocidade da luz ( $c \cong 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ )

$\lambda$  é o comprimento da onda ( $m$ )

Como discutido anteriormente, os fenômenos que ocorrem no topo da atmosfera durante a incidência da radiação solar são exemplos de diversos processos que podem ser desencadeados pela interação entre a luz e a matéria. Entre esses processos, destacam-se a absorção, reflexão, espalhamento e, em alguns casos,

reações fotoquímicas. Quando parte da energia absorvida é convertida em calor, ocorre o processo fototérmico, que resulta no aquecimento do material, podendo causar sua contração ou expansão (Lima, 2020).

No que diz respeito ao efeito fotovoltaico:

“É possível excitar um átomo, colocando-o em um nível energético maior do que o seu estado fundamental, através da irradiação por luz, com consequente absorção de fótons, desde que esses possuam energia suficiente para a transição entre os níveis de energia...” (LIMA, 2020)

Quando essa transição de portadores de carga ocorre da banda de valência para a banda de condução — região onde os elétrons estão livres para se mover — em um material semiconductor, há um aumento significativo na condutividade elétrica do material. Diferentemente de outros materiais, os semicondutores possuem um gap, ou lacuna energética, entre essas duas bandas. A energia associada a esse gap é inferior a 3 eV (Lima, 2020).

Tabela 4.1 - Espectro eletromagnético e energia de fóton associada

| <b>Radiação Espectral</b>       | <b>Comp. de onda (<math>\lambda</math>)</b> | <b>Energia de fóton (<math>E_F</math>)</b> |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Radiofrequência (RF)</b>     | $\lambda < 1 \text{ mm}$                    | $E_F > 1 \text{ meV}$                      |
| <b>Infravermelho (IR)</b>       | $700 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$   | $1,78 \text{ eV} > E_F > 1 \text{ meV}$    |
| <b>Visível</b>                  | $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ | $3,1 \text{ eV} > E_F > 1,78 \text{ eV}$   |
| <b>Ultravioleta</b>             | $1 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$   | $1,25 \text{ keV} > E_F > 3,1 \text{ eV}$  |
| <b>Raio X</b>                   | $5 \text{ pm} < \lambda < 1 \text{ nm}$     | $250 \text{ keV} > E_F > 1,25 \text{ keV}$ |
| <b>Raio <math>\gamma</math></b> | $\lambda < 5 \text{ pm}$                    | $E_F > 250 \text{ keV}$                    |

Fonte: Adaptado do EISBERG apud LIMA

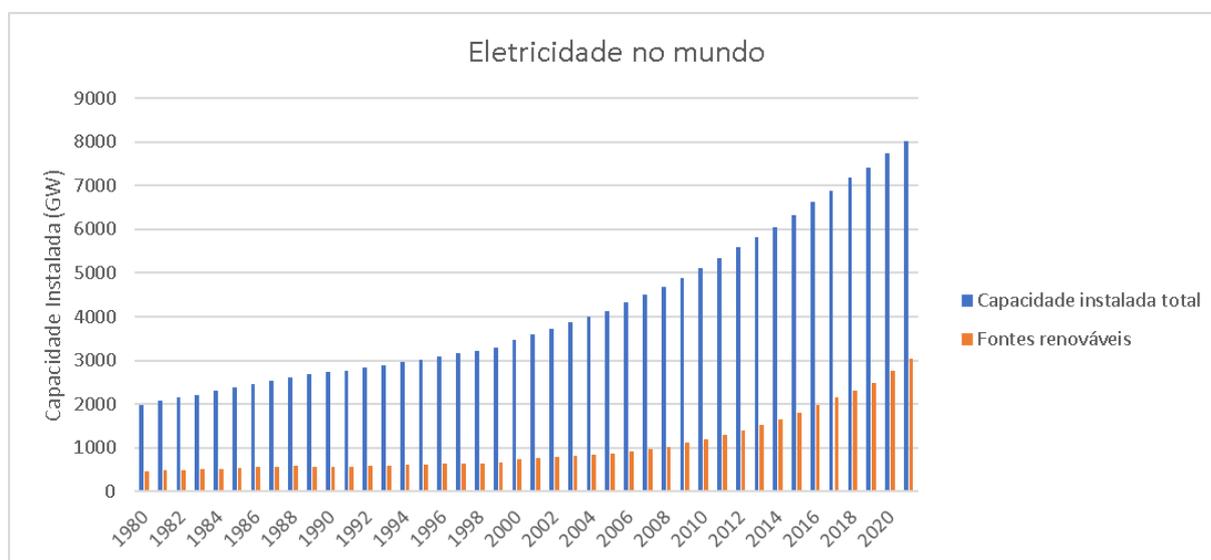
## 4.2 PANORAMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO

De acordo com a Administração de Informações de Energia dos Estados Unidos (EIA), em 2023, as fontes renováveis representaram aproximadamente 40% da capacidade instalada mundial, um aumento de cerca de 15% em comparação a 1980. No Brasil, a participação é ainda mais expressiva, com 89,2% da matriz elétrica nacional composta por fontes renováveis (EIA, 2023).

Em 2019, de acordo com o Plano Decenal de Expansão Energética 2030, foram instalados no Brasil 1,5 GW em sistemas de Minigeração e Microgeração Distribuída, sendo a fonte fotovoltaica a segunda com maior participação, atrás apenas da hidrelétrica (PDE 2030, 2019). Até 31 de março de 2023, segundo a ANEEL, mais de 1,8 milhão de sistemas renováveis de geração distribuída foram instalados no Brasil, totalizando aproximadamente 19 GW de potência. A maior parte dessa capacidade é composta por sistemas solares fotovoltaicos (FIGURA 4.1). Em 2024, o Brasil ultrapassou 4 milhões de consumidores com energia solar, com 457 mil novos sistemas instalados, totalizando 4,9 GW de potência adicionada (Portal Solar, 2024).

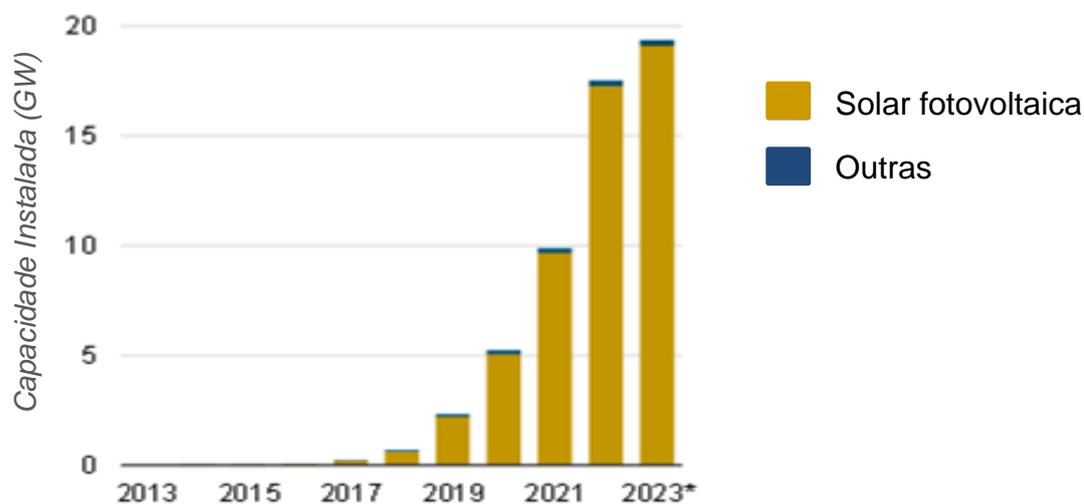
Essa expansão da energia solar fotovoltaica deve-se, entre outros fatores, à sua concepção como uma fonte limpa e perene, mas, principalmente, ao sistema nacional de compensação de créditos e à flexibilidade das potências modularizadas, que permitem a instalação desde pequenos sistemas até grandes usinas fotovoltaicas (Portal Solar).

Figura 4.1 - Capacidade instalada mundial de energia elétrica



Fonte: EIA

Figura 4.2 - Geração distribuída no Brasil

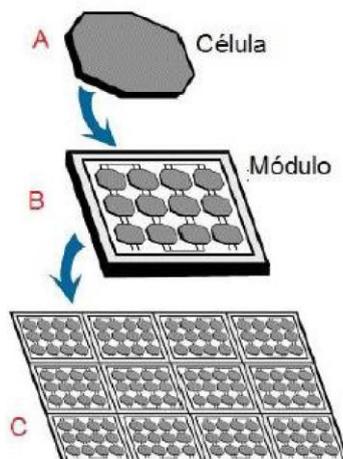


Fonte: EIA *apud* ANEEL

### 4.3 TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

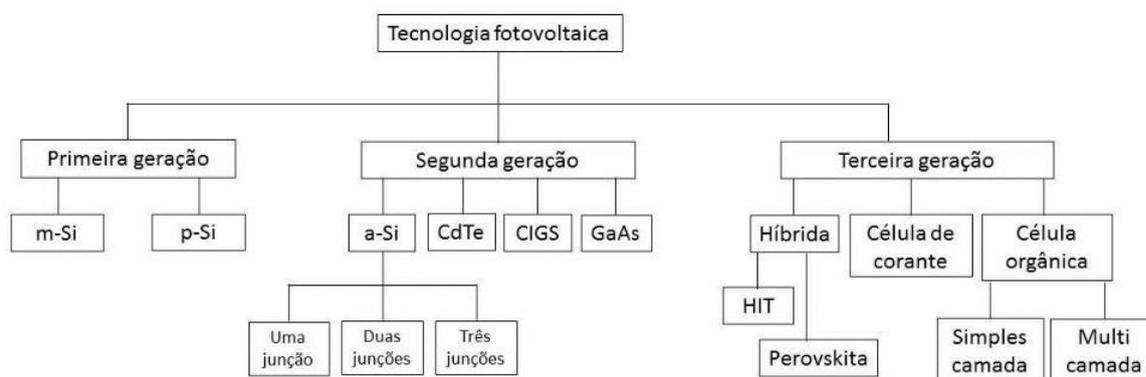
O módulo fotovoltaico, popularmente conhecido como painel solar, é o principal componente de um sistema fotovoltaico. Essencial para qualquer instalação desse tipo, ele abriga as células fotovoltaicas, que são as unidades básicas responsáveis pela conversão de fótons em eletricidade. (Brasil, 2010) As células fotovoltaicas podem ser conectadas em série ou em paralelo, sendo o conjunto encapsulado para formar o módulo fotovoltaico, conforme a Figura 4.3. Na literatura, as tecnologias dessas células são classificadas em três gerações, como ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.3 - De célula a gerador fotovoltaico: (a) Célula fotovoltaica, (b) Módulo fotovoltaico e (c) Conjunto de módulos fotovoltaicos



Fonte: BRASIL, 2010 *apud* GHIZONI

Figura 4.4 - Tecnologias de módulos fotovoltaicos



Fonte: KUMAR, 2017 *apud* BÜLLER, 2018

#### 4.3.1. Módulos fotovoltaicos de 1ª geração

As primeiras células fotovoltaicas comerciais foram feitas de silício cristalino e arseneto de gálio. As células de silício cristalino podem ser monocristalinas (m-Si) ou policristalinas (p-Si). Dentro dessa geração de painéis solares, as células de silício monocristalino são mais eficientes, porém mais caras, devido ao processo de fabricação mais sofisticado (Zilles, 2012).

A maioria dos painéis solares comercializados atualmente pertence à 1ª geração, com mais de 95% de participação no mercado global de painéis fotovoltaicos fabricados com silício cristalino. Por essa razão, a maioria dos estudos sobre

Avaliação de Ciclo de Vida de módulos fotovoltaicos concentra-se em módulos com células de silício cristalino (IRENA, 2023).

Além dos materiais semicondutores, os módulos fotovoltaicos (FV) são compostos por vidro, alumínio, cobre e prata. O vidro e o alumínio desempenham a função de proteger e conferir resistência ao equipamento (Figura 4.5). Já os polímeros são utilizados para unir os componentes e proporcionar proteção adicional (Coelho, 2018). A Tabela 4.1 mostra a composição mássica média desses módulos.

Figura 4.5 - Componentes das camadas de um módulo de silício cristalino



Fonte: SOLAR, 2016 *apud* COELHO, 2018

Tabela 4.1 - Composição de massa painéis fotovoltaicos c-Si

| <b>Material</b> | <b>Composição (%)</b> |
|-----------------|-----------------------|
| Vidro           | 70                    |
| Cobre           | 0,461                 |
| Alumínio        | 18,5                  |
| Silício         | 3,65                  |
| Prata           | 0,053                 |
| EVA             | 5,1                   |
| PVF             | 1,5                   |
| PVC             | 0,683                 |
| Estanho         | 0,0265                |
| Chumbo          | 0,0265                |
| <b>Total</b>    | <b>100</b>            |

Fonte: Latunussa, 2016 *apud* Singh, 2021

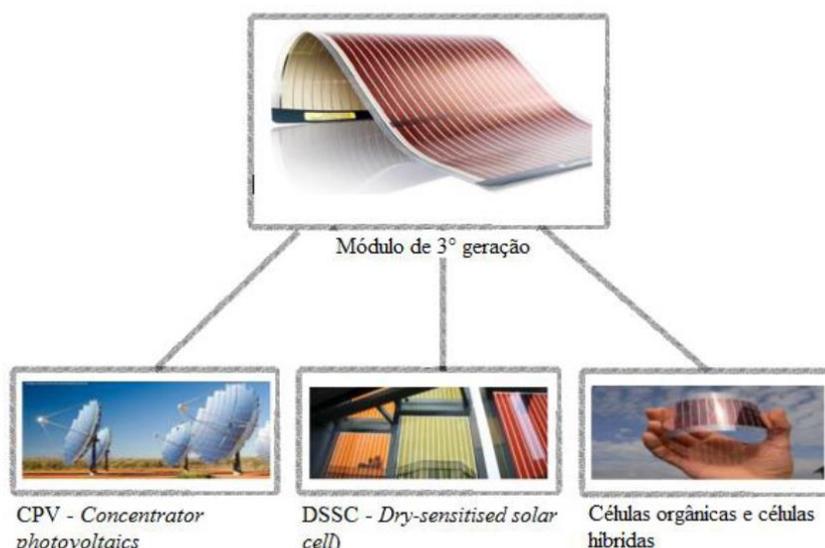
#### 4.3.2. Módulos fotovoltaicos de 2ª geração

Essa geração de módulos fotovoltaicos também é conhecida como módulos de células de filme fino. Os semicondutores utilizados nessa tecnologia incluem silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre e índio (CIS), arseneto de gálio (GaAs), disseleneto de cobre e índio (CIS) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). Na fabricação desses módulos, os semicondutores são aplicados em um substrato, que pode ser rígido ou flexível, por meio de deposição por vaporização catódica ou banho eletrolítico. Apesar do baixo custo, apresentam eficiência inferior em comparação às células de silício cristalino (Pinho *apud* Miranda, 2019).

#### 4.3.3. Módulos fotovoltaicos de 3ª geração

Diferentemente das células fotovoltaicas de primeira e segunda gerações, as tecnologias englobadas nas células de terceira geração possuem uma definição mais ampla e, muitas vezes, ambígua. Contudo, essas tecnologias incluem módulos compostos por células de concentradores solares (CPV, do inglês **Concentrator Photovoltaics**) e semicondutores orgânicos. Esses materiais podem ser formados por pequenas moléculas, como os módulos DSSC (**Dye-Sensitized Solar Cells**), células orgânicas e células híbridas (Ely, 2014).

Figura 4.6 - Módulos fotovoltaicos de 3ª geração



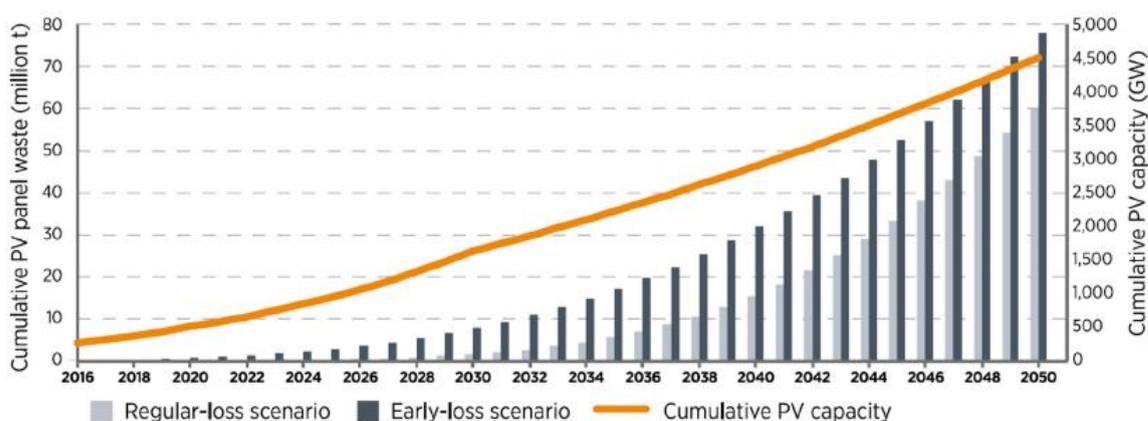
Fonte: Adaptado de SOLAR, 2016 *apud* COELHO, 2018

#### 4.4 TECNOLOGIAS DE GESTÃO DE FIM DE VIDA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

De acordo com a previsão da Agência Internacional de Energias Renováveis a quantidade de resíduos fotovoltaicos deverá alcançar entre 1,7 e 8 milhões de toneladas até 2030 e entre 60 e 78 milhões de toneladas até 2050 ((IRENA).

“Dado que existem metais pesados na composição dos módulos, a sua deposição em aterro pode resultar em problemas ambientais, além dos custos associados... Embora as células solares de filme fino usem muito menos material do que as células c-Si, existem preocupações acerca da disponibilidade e toxicidade de materiais como o Telúrio (Te), Índio (In) e Cádmio (Cd)” (ANSANELLI, 2021).

Figura 4.7 - Projeção de acúmulo de módulos fotovoltaicos



Fonte: IRENA

Se não forem descartados corretamente, os resíduos fotovoltaicos podem representar uma ameaça à saúde humana e ao meio ambiente. Na incineração, por exemplo, substâncias perigosas podem ser liberadas no ar. Além disso, como a maioria dos componentes não é biodegradável, haverá uma ocupação crescente de áreas no solo. Nesse contexto, a reciclagem surge como uma estratégia eficaz para minimizar esses impactos, reduzindo a quantidade de resíduos destinados a aterros.

A recuperação dos componentes dos módulos fotovoltaicos também pode reduzir significativamente o custo de produção de novos equipamentos e, conseqüentemente, seu preço no mercado (Latunussa, 2016).

Para isso, é necessário estabelecer leis e normas específicas para a gestão desses resíduos, além de aperfeiçoar as tecnologias de reciclagem atualmente empregadas. No cenário global, a Europa é a única região que conta com uma estrutura regulatória sólida e clara de apoio à reciclagem de módulos fotovoltaicos (Marques *et al.*, 2018). Em 2003, entrou em vigor a Diretiva Europeia de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (**WEEE**, sigla em inglês), que estabelece medidas estratégicas para a coleta, reutilização segura, reciclagem e recuperação de equipamentos elétricos e eletrônicos ao final de seu ciclo de vida (Anselmo, 2019).

Além disso, a Alemanha possui a **EletroG** (Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos), que, desde 2015, inclui equipamentos fotovoltaicos. Em contrapartida, a maioria dos países, como os Estados Unidos e o Brasil, ainda não possui legislação específica para a gestão de resíduos eletroeletrônicos (Anselmo, 2019).

No Brasil, não existe uma regulação específica para reciclagem de painéis fotovoltaicos. Assim, a reciclagem desses equipamentos é feita com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e nos decretos números 10.240/2020, 11.043/2022 e 10.936/2022. Esses instrumentos legais, estabeleceram a obrigatoriedade da logística reversa no Brasil. Porém, a reciclagem nacional de equipamentos fotovoltaicos limita-se apenas à etapa de separação mecânica (SOUZA *et al.*, 2024)

Nos últimos anos registrou-se um aumento de investigações científicas sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício. Ramírez-Cantero *et al.*, numa análise bibliométrica, identificaram um crescimento exponencial de publicações científicas sobre reciclagem de painéis solares de silício – de 21 em 2020 para 58 em 2023 – cerca de 280% de aumento. Os autores (Ramírez-Cantero *et al.* apud AIE), atribuíram esse crescimento ao aumento da quantidade desses painéis que chegam ao fim de vida útil e a projeção de crescimento em instalações fotovoltaicas. A maioria desses estudos foram registrados na China, Austrália e Itália sendo China responsável por cerca de 90% das publicações no período de 2020-2024.

Os aterros sanitários continuam sendo o principal destino de módulos fotovoltaicos no fim de vida e outros resíduos eletroeletrônicos. Além disso, a maioria de painéis reciclados hoje são processados em usinas de reciclagem geral existentes

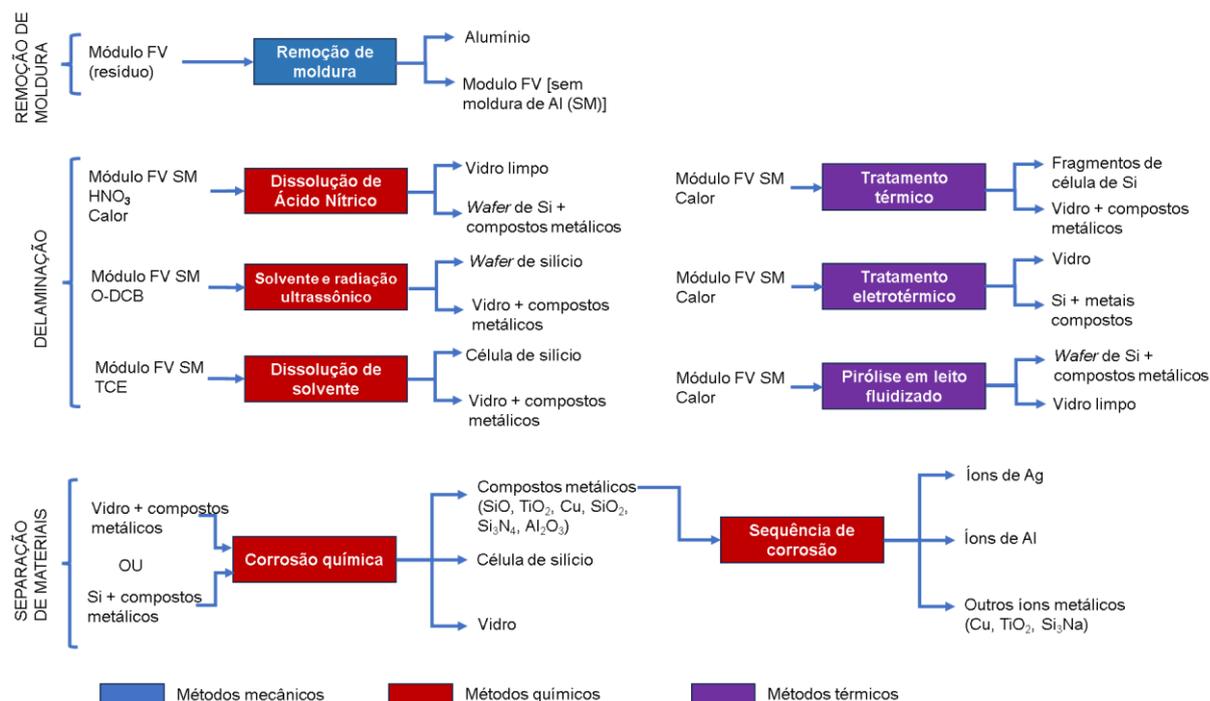
onde os materiais com maiores contribuições mássicas como alumínio, vidro e cobre são recuperados. Os outros materiais como silício e prata, apesar de seu valor superior, acabam em aterros (IRENA e IEA-PVPS, 2016).

Ao longo dos anos, empresas de energia solar e institutos de pesquisa conduziram diversas pesquisas sobre técnicas de reciclagem de módulos FV de silício. Esses estudos resultaram na implantação de diversas plantas especializadas de reciclagem desses equipamentos (IRENA e IEA-PVPS, 2016). No entanto, algumas técnicas ainda são incipientes, mas apresentam grande potencial de desenvolvimento (Azeumoa *et al*, 2019).

Apesar de suas peculiaridades, os processos de reciclagem de painéis solares de silício seguem três etapas básicas: (1) desmontagem, (2) delaminação e (3) triagem (ou separação) e extração. Na etapa de desmontagem, a moldura é removida da estrutura do módulo, que, em seguida, passa pela delaminação, processo que se concentra principalmente na remoção eficaz de EVA para facilitar a recuperação de vidro, *wafers* de silício e metais de valor agregado. A etapa final consiste em separar e recuperação dos materiais valiosos constituintes: vidro, alumínio, cobre e prata (Ramírez-Cantero *et al*, 2024; Deng, 2022; Singh, 2021; Latunussa *et al* 2016; Ansanelli *et al*, 2021; Maani *et al*, 2024).

Maani *et al* (2024), identificaram 10 diferentes técnicas de delaminação de módulos fotovoltaicos e separação dos materiais, sendo 6 aplicadas a módulos fotovoltaicos de silício (c-Si) e 4 para painéis solares de telureto de cádmio (CdTe). As técnicas de reciclagem de módulos FV c-S identificadas envolvem 3 estágios: (1) a desmontagem manual dos componentes, (2) remoção da camada de EVA para separar vidro do *wafers* de células de silício e (3) a separação dos materiais (vidro, Si, Cu e Ag). As diferenças entre os processos residem nos métodos usados nos estágios 2 (remoção por tratamento térmico e remoção por tratamento químico) e produtos químicos usados no estágio 3, conforme ilustrados na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Métodos de delaminação e separação de módulos fotovoltaicos c-Si



Fonte: Adaptado de Maani et al, 2020

Singh (2021), explorou alguns processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício com ênfase nos processos FRELFP (*Full Recovery from End-of-Life Photovoltaic*) e o LGRF (*Laminated Glass Recycling Facility*) que já se encontravam na fase piloto. O processo FRELFP é analisado neste trabalho.

Jadhav *et al*, discutiram vários métodos empregados para a recuperação de prata na reciclagem de painéis solares.

No entanto, muitos pesquisadores destacam a carência de estudos que avaliem os impactos ambientais associados aos métodos de reciclagem atualmente empregados (Deng, 2022; Singh, 2021; Prabhu, 2021; Seo, 2021).

#### 4.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A preocupação com custo e desempenho de produtos era o foco das indústrias. Porém, a imposição de leis específicas motivadas pelo princípio de desenvolvimento sustentável, contribuiu para que questões ambientais e sociais fossem incorporadas ao modo de produção. Assim, a avaliação do sucesso de um produto deixou de limitar-se apenas ao custo pecuniário para o cliente e à capacidade de ele atender seu objetivo e passou também a englobar fatores como redução de uso de recursos na sua fabricação e redução de impactos ambientais negativos de seu uso ou consumo

e de seus resíduos (OMETO *et al*, 2007). Nesse contexto, nasceu a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A preocupação com custo e desempenho de produtos era, inicialmente, o principal foco das indústrias. Contudo, a imposição de leis específicas, motivadas pelo princípio do desenvolvimento sustentável, incentivou a incorporação de questões ambientais e sociais ao modelo de produção. Dessa forma, a avaliação do sucesso de um produto deixou de se restringir apenas ao custo financeiro para o cliente e à sua funcionalidade, passando a incluir aspectos como a redução no uso de recursos durante a fabricação, a diminuição de impactos ambientais negativos decorrentes de seu uso ou consumo e o gerenciamento de seus resíduos (Ometo *et al.*, 2007). Nesse contexto, surgiu a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

#### **4.5.1. História de ACV**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia robusta que permite analisar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essa ferramenta possibilita a identificação dos estágios do ciclo de vida que mais contribuem para os impactos ambientais do objeto de estudo. Por meio da aplicação da ACV, é possível avaliar a viabilidade de implementar melhorias ou alternativas em produtos, processos ou serviços, promovendo maior sustentabilidade (Marques, 2018).

A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo) (ABNT, 2009).

Dessa forma, essa metodologia tem subsidiado a tomada de decisões estratégicas e as práticas de marketing nas indústrias. Empresas que não controlam os impactos ambientais de seus produtos e/ou serviços enfrentam o risco de perder competitividade no mercado e estão sujeitas a penalizações (Coltro, 2007).

Sobre a origem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Coltro (2007) afirma que os primeiros estudos nessa área remontam à década de 1960, em meio à crise do petróleo, que despertou a conscientização sobre a limitação dos recursos naturais. Em 1972, um grupo formado por acadêmicos, políticos e representantes da indústria

lançou o estudo "**Limites do Crescimento**", que alertava para as consequências do desequilíbrio entre o consumo e a oferta de recursos naturais. Segundo o estudo, a continuidade desse descompasso poderia levar o planeta ao colapso.

O primeiro estudo que pode ser entendido como ACV foi realizado em 1965 nos Estados Unidos pela Coca-Cola, com o objetivo de identificar qual embalagem para refrigerantes teria as menores emissões e utilizaria menos recursos em sua fabricação. O estudo fez um inventário das matérias-primas e dos combustíveis utilizados e das cargas ambientais do processo produtivo de cada embalagem e ficou conhecido como Resource and Environmental Profile Analysis (REPA) (CURRAN, 2006 *apud* IBICT).

No entanto, com o fim da crise do petróleo, os estudos sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) perderam força, ressurgindo apenas na década de 1980. Nesse período, o interesse pela ACV aumentou significativamente, gerando diversos estudos e pesquisas com o objetivo de aprimorar a ferramenta. Contudo, esse crescimento trouxe desafios devido aos resultados divergentes obtidos na avaliação de um mesmo produto.

Para minimizar essas discrepâncias, tornou-se necessária a padronização da metodologia. Assim, após contribuições de várias organizações, com destaque para a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (**SETAC**, sigla em inglês), a Organização Internacional para Padronização (**ISO**, sigla em inglês) iniciou, em 1997, a publicação da série de normas **ISO 14040**, que estabelece requisitos e orientações para a execução de estudos de ACV:

- **ISO 14040** – *Environmental management – Life cycle assessment* – Principles and framework (2006): Estabelece os princípios e a estrutura para a execução de estudos de ACV.
- **ISO 14041** – *Environmental management – Life cycle assessment* – Goal and scope definition and inventory analysis (1998): Define os objetivos, o escopo e as diretrizes para a análise do inventário.
- **ISO 14042** – *Environmental management – Life cycle assessment* – Life cycle impact assessment (2000): Detalha o procedimento para avaliação dos impactos no ciclo de vida.

- **ISO 14043** – *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation* (2000): Fornece orientações para a interpretação dos resultados de estudos de ACV.
- **ISO 14044** – *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines* (2006): Consolidada os requisitos e diretrizes para a realização de estudos de ACV, substituindo as normas anteriores (ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043).

A série de normas **ISO 14040** também inclui dois relatórios técnicos e uma especificação técnica, que fornecem exemplos práticos e orientações adicionais para a aplicação das normas relacionadas à ACV, além de padronizar o formato da documentação dos dados:

- **ISO/TR 14047** – *Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042* (2012): Apresenta exemplos práticos sobre a aplicação da **ISO 14042**, com foco na avaliação de impactos no ciclo de vida.
- **ISO/TS 14048** – *Environmental management – Life cycle assessment – Data documentation format* (2002): Define o formato técnico para a documentação de dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), promovendo uniformidade e comparabilidade.
- **ISO/TR 14049** – *Environmental management – Life cycle assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* (2012): Fornece exemplos práticos de como aplicar a **ISO 14041**, abordando a definição de objetivos, escopo e análise de inventário.

Essas normas foram aprimoradas e atualizadas ao longo dos anos, acompanhando o avanço dos estudos, congressos e conferências sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Ibict; Bezerra et al., 2018).

No Brasil, essas normas são representadas por suas correspondentes elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), descritas como "uma adoção idêntica, em conteúdo técnico, estrutura e redação" às normas da série **ISO 14040** (ABNT NBR ISO 14040:2009).

Com o objetivo de fomentar a aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro) criou, em 2010, o **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV)**. Esse programa é composto por órgãos governamentais, entidades industriais, instituições acadêmicas e de pesquisa.

#### **4.5.2. Etapas de ACV**

Segundo a **ABNT NBR ISO 14040:2009**, um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é composto por quatro fases principais, que serão detalhadas a seguir:

- **Definição do objetivo e escopo**
- **Análise de inventário**
- **Avaliação de impacto**
- **Interpretação**

A definição do **objetivo e escopo da ACV** estabelece a abrangência do estudo e depende do objeto ou atividade a ser avaliado, bem como do uso pretendido dos resultados. Nessa fase, são definidos de acordo com os objetivos;

- As limitações e estimativas;
- As categorias de impactos a serem adotadas;
- Os parâmetros do estudo, incluindo os recursos, as fronteiras do sistema, a unidade funcional e as premissas gerais.

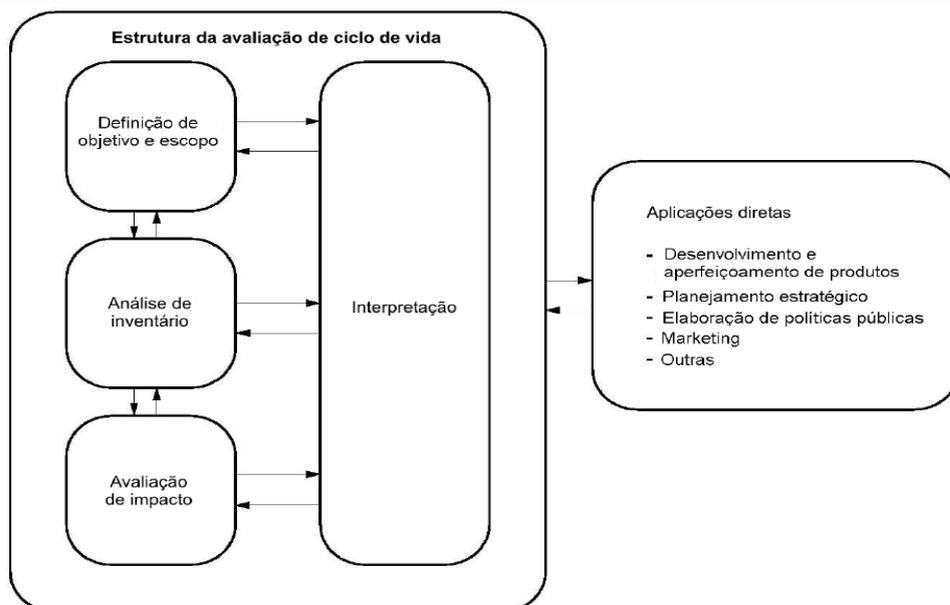
A **delimitação de fronteira** define onde começa e termina o estudo, determinando quais processos, atividades e fluxos de materiais e energia serão incluídos ou excluídos da avaliação. Para um mesmo produto ou atividade, fronteiras distintas podem levar a resultados diferentes, o que ressalta a importância dessa etapa para a consistência do estudo.

A unidade funcional é a medida pela qual o desempenho ambiental de um produto é avaliado, sendo essencial para garantir a comparabilidade entre diferentes produtos ou processos na análise do ciclo de vida. Essa medida é definida com base no objetivo e escopo do estudo e descreve a quantidade ou o desempenho do produto ou serviço avaliado.

Em caso de módulo fotovoltaicos há vários parâmetros que podem ser usados para definição da unidade funcional: área, massa, volume, quantidade e potência elétrica do painel. A escolha de um ou outro depende do objetivo do estudo de ACV (ILCD Handbook, 2010).

Por exemplo, em uma ACV de um módulo fotovoltaico no final de sua vida útil, a unidade funcional pode ser definida como a quantidade ou massa de painéis solares a ser estudada. Essa definição permite comparar os impactos ambientais entre diferentes módulos fotovoltaicos, levando em consideração fatores como quantidade e massa.

Figura 4.9 - Fases do estudo de ACV



Fonte: ABNT, 2009

A segunda etapa, chamada **Análise de Inventário**, envolve a coleta de dados necessários para atingir os objetivos definidos na fase de definição do objetivo e escopo. Essa etapa inclui a elaboração de um fluxograma e o desenvolvimento de procedimentos de cálculo para quantificar os fluxos significativos (entradas e saídas) do sistema em estudo. Um dos principais objetivos do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) é a elaboração de inventários-base para a indústria (IBICT, 2024).

Após a definição dos objetivos, a delimitação do escopo e a coleta dos dados, inicia-se a fase central da ACV: a **Avaliação de Impacto**. O objetivo dessa etapa é compreender os impactos ambientais ao associar os dados coletados às categorias de impacto específicas e seus respectivos indicadores.

A última fase da ACV é a **Interpretação**, que busca traduzir os dados coletados e as correlações estabelecidas no inventário em conclusões e recomendações práticas. Os resultados dessa etapa são utilizados para aprimorar produtos, processos

ou suas partes específicas, além de serem comunicados aos interessados.

É importante destacar que essas etapas não são isoladas, mas inter-relacionadas. Assim, em qualquer momento do estudo, pode ser necessário revisar ou modificar etapas anteriores para garantir a consistência e a precisão da análise.

#### 4.5.3. Categorias de Impacto Ambiental

De acordo com a **NBR ISO 14040:2009**, uma categoria de impacto ambiental é definida como uma "classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados". Essas categorias são utilizadas para avaliar e quantificar os diferentes tipos de impactos que um produto, processo ou serviço pode gerar sobre o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida.

A identificação dessas categorias permite a comparação e priorização dos impactos ambientais, servindo como base para a tomada de decisões mais sustentáveis.

Existem várias categorias de impacto ambiental que podem ser consideradas em uma ACV, e a escolha das categorias depende do objetivo da análise, do escopo do estudo e das características específicas do produto ou serviço em avaliação.

O manual de ACV do Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD), possui recomendações de categorias de avaliação de ciclo de vida (ILCD Handbook, 2010). São eles:

- **Mudança climática:** Avalia as emissões de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global e alterações climáticas.
- **Depleção de ozônio (estratosférico):** Analisa as emissões que causam a redução da camada de ozônio estratosférico, resultando em impactos negativos à saúde humana e aos ecossistemas.
- **Toxicidade humana:** Mede o potencial de substâncias químicas em causar efeitos adversos à saúde humana, incluindo toxicidade aguda ou crônica.
- **Formação de partículas finas:** Avalia os impactos na saúde humana devido à exposição a partículas suspensas no ar.
- **Radiação ionizante:** Analisa os impactos na saúde humana causados pela exposição à radiação ionizante.

- **Formação fotoquímica de ozônio:** Examina a formação de ozônio troposférico, que pode prejudicar a saúde humana e os ecossistemas.
- **Acidificação:** Avalia as emissões que contribuem para a acidificação do solo, da água e dos ecossistemas, causando danos à biodiversidade e aos organismos vivos.
- **Eutrofização:** Mede os impactos de emissões que enriquecem corpos d'água com nutrientes, levando à proliferação excessiva de algas e à deterioração da qualidade da água.
- **Ecotoxicidade:** Analisa o potencial de substâncias químicas em causar efeitos adversos em organismos e ecossistemas terrestres e aquáticos.
- **Uso do solo:** Avalia os impactos associados à ocupação de áreas naturais, conversão de habitats e perda de biodiversidade.
- **Esgotamento de recursos naturais:** Mede o consumo e a redução de recursos naturais não renováveis, como minerais, combustíveis fósseis e fontes de energia renovável.
- **Saúde humana:** Avalia o dano potencial à saúde humana, frequentemente expresso em Anos de Vida Ajustados por Incapacidade (DALYs). Inclui impactos associados a mudanças climáticas, redução da camada de ozônio, toxicidade humana, material particulado e radiação ionizante.
- **Qualidade do ecossistema:** Mede o dano potencial aos ecossistemas, frequentemente expresso em perda de espécies ou degradação do ecossistema. Inclui impactos de acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo.
- **Recursos naturais:** Avalia o esgotamento de recursos naturais, tanto minerais quanto fósseis, frequentemente medido em termos de energia excedente necessária para a extração futura.

As 11 primeiras categorias de impacto estão relacionadas ao nível **midpoint** de avaliação de impacto ambiental, enquanto as três últimas estão associadas ao nível **endpoint** (ILCD Handbook, 2010).

#### 4.5.4. Níveis de Avaliação de Impacto Ambiental

A cada método de avaliação de impacto ambiental, é atribuído um nível de impacto que pode ser *midpoint*, *endpoint* ou combinado.

No seu trabalho de dissertação, Mendes abordou as características dos três níveis de ACV. O nível de impacto ambiental *midpoint* a caracterização usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao final da categoria. Já no nível *endpoint*, a caracterização usa todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final. Isso significa que, nesse último, é considerado um conjunto de pontos finais de uma determinada categoria – uma área de proteção, mais ampla. Em relação a incertezas envolvidas, o nível *midpoint* possui grau de incertezas menor e permite uma análise mais detalhada devido a seu grande número de categorias de impactos, o que explica sua ampla aceitação e uso. Por sua vez, o nível *endpoint* possui a vantagem de permitir a comparação entre produtos, não apenas entre suas categorias de impacto. O nível combinado de impacto considera as vantagens de *midpoint* e *endpoint*.

#### **4.5.5. Métodos de Avaliação de Ciclo de Vida**

Existem diferentes métodos para realizar a ACV, conforme resumido no Quadro 4.2. A diferença desses métodos é a quantidade de categorias de impacto ambiental avaliadas e suas abrangências de aplicação. Um método de avaliação de impacto ambiental, pode ter categorias com abrangências distintas: global, continental ou nacional. As categorias de impacto ambiental da maioria dos métodos possuem aplicação continental e nacional - majoritariamente na Europa – onde a maioria dos métodos foram desenvolvidos. Todas as categorias dos métodos mais recentes como USEtox e IMPACT World+ possuem aplicação global. Isso foi possível porque seu desenvolvimento envolveu pesquisadores do mundo todo demonstrando assim, uma tentativa de globalizar esses métodos (MENDES, 2016). Porém, haverá sempre a necessidade de inclusão de categorias mais específicas e particulares a uma certa região. No que tange a estudos de ACV de módulos fotovoltaicos há uma ampla preferência para o método ReCiPe

Quadro 4.2. - Métodos de ACV e suas abrangências

| Métodos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) | Desenvolvido por / País  | Abrangência de aplicação Global |     |                                    |  |
|---|--|---------------------------------|-----|------------------------------------|--|
|   |  | Sim                             | Não | Para algumas categorias de impacto | Para maioria das categorias de impacto |
| CML 2002                                    | CML – Holanda  |                                 |     |                                    | X                                      |
| Eco-indicator99                             | Pré – Holanda  |                                 |     | X                                  |  |
| Ecological Scarcity                         | B2 + BSU-services – Suíça  |                                 |     | X                                  |  |
| EDIP 2003                                   | DTU – Dinamarca  |                                 |     | X                                  |  |
| EPS 2000                                    | IVL – Suécia   |                                 |     |                                    | X                                      |
| Impact 2002+                                | BPFL – Suíça   |                                 | X   |                                    |  |
| LIME  | AIST – Japão   |                                 | X   |                                    |  |
| LUCAS                                       | CIRAIG – Canadá  |                                 |     | X                                  |  |
| MEEuP                                       | VhK – Holanda  |                                 | X   |                                    |  |
| ReCiPe                                      | RUN + PRé + CML + RIVM – Holanda   |                                 |     | X                                  |  |
| TRACI                                       | US EPA – Estados Unidos  |                                 |     | X                                  |  |
| USEtox                                      | Programa Iniciativa do Ciclo de Vida da UNEP – SETAC   | X                               |     |                                    |  |
| IMPACT World+                               | CIRAIG, da Politécnica de Montreal (Canadá), Universidade de Michigan (Estados Unidos), Universidade de Ann Arbor (Estados Unidos), Quantis (Suíça), Universidade Técnica da Dinamarca – DTU (Dinamarca), Escola Politécnica de Lausanne – EPFL (Suíça) e Cycleco (França) | X                               |     |                                    |  |

FONTE: Adaptado de MENDES, 2015

#### 4.5.6. Bancos de dados de ACV

Banco de dados de ACV são conjuntos de dados ambientais constituídos a partir de Inventários de Ciclo de Vida de diversos processos com elementos comuns a processos de ciclo de vida de vários produtos ou serviços. Esses dados envolvem materiais como cerâmicos, metálicos etc.; e energia nas suas diferentes formas como elétrica, térmica, química etc. Pela grande variedade e particularidade dos processos próprios torna-se difícil possuir uma base de dados de todos os processos. Há vários

bancos de dados de ACV, porém, o mais usado é o EcolInvent.

EcolInvent foi desenvolvido pela empresa Suíça do mesmo nome. O banco de dados inclui dados sobre energia, extração de recursos, fornecimento de materiais, produtos químicos, metais, agricultura, gestão de resíduos e transporte. Além do seu alcance global, o EcolInvent possui uma ampla gama de dados e é atualizado regularmente (GOEDKOOOP *et al*, 2010). Em todos os estudos de ACV de módulos fotovoltaicos lidos para este trabalho, usou-se, quando necessário, dados secundários do EcolInvent no Inventário de Ciclo de Vida.

O Brasil ainda não possui banco de dados que representem a realidade da indústria brasileira (ACV Brasil).

“Com o propósito de desenvolver uma metodologia de execução da ACV adequada às condições brasileiras e à construção de um banco de dados regional, foi implementado no Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) o Grupo de Prevenção da Poluição (GP2) que tem se dedicado a estudos abordando a problemática ambiental para a prevenção da poluição atuando com a ACV de maneira a divulgar essa ferramenta.” (RIBEIRO, 2009 *apud* CAMPOLINO, 2015)

Esse grupo tem publicado vários estudos de ACV com inventários baseados nas realidades da indústria brasileira, embora ainda não publicou um banco de dados nacional de ACV.

#### **4.5.7. Softwares para ACV**

Há vários tipos de *softwares* específicos para a realização de um estudo de Avaliação de Impacto Ambiental. Foram desenvolvidos para lidar com grande volume de informações e cálculos de um estudo de ACV. Esses *softwares* usam dados de vários processos que compõem o ciclo de vida de um produto, como matéria-prima, energia, transporte e resíduos, e os relaciona com as respectivas categorias de impacto ambiental. O mais usado é a SimaPro. Além dele, existem outros como Umberto Efficiency+, Quantis Suite, Umberto LCA+, e!Sankey, SHDB, openLCA, GaBi 6, e outros (ACV Brasil e EnCiclo). Além de possuírem banco de dados diferentes, cada software possui particularidades nos métodos de inserção de dados e de apresentação de resultados.

SimaPro foi desenvolvido em 1990 por *PRe Sustainability*, uma empresa holandesa que fornece consultoria, treinamento e softwares na área de

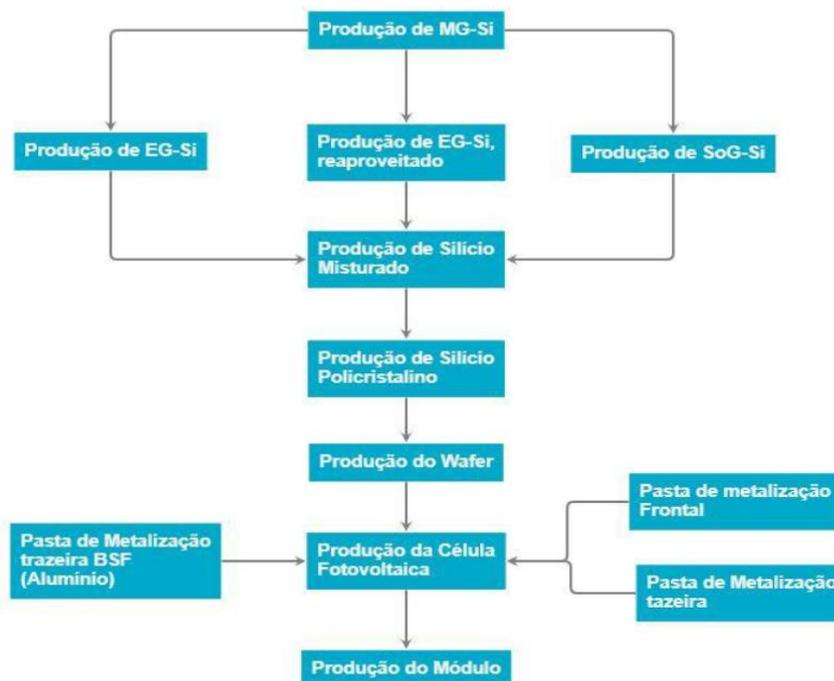
sustentabilidade. É o software mais usado para ACV. Ele possui vários métodos de impacto como CML-92, Eco-indicator 99 e outros; e vários bancos de dados como BUWAL 250, EcoInvent, IVAM LCA Data e outros. É o mais usado na Avaliação de Ciclo de Vida de módulos fotovoltaicos devido sua robustez que permite comparar e analisar ciclos de vida complexos que envolvem produtos com diferentes componentes e composição como é o caso de módulo fotovoltaicos (CAMPOLINA, 2015).

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta etapa de estudo pesquisou-se por *strings* “*LCA Photovoltaic modules*” e “*ACV painel fotovoltaico*”, encontrou-se trabalhos nacionais e internacionais sobre Avaliação de Ciclo de Vida de módulos fotovoltaicos – desde revisões bibliográficos e estudos laboratoriais até estudos de casos na escala industrial. Com base nos objetivos e métodos selecionou-se apenas os trabalhos que realizaram estudos de ACV e que são recentes – últimos 5 anos. Alguns trabalhos estudaram a ACV de painéis fotovoltaicos considerando apenas os processos de extração e fabricação dos equipamentos. A maioria dos trabalhos considerados estudaram ACVs considerando todo ciclo de vida de painéis fotovoltaicos – do berço ao túmulo.

O trabalho de Bezerra *et al* (2018) realizou ACV para módulo fotovoltaico. Definiu como Unidade Funcional um painel JKM315P-72 da Jinko Solar. O Estudo englobou os processos de extração de matérias-primas e da manufatura do módulo. Ou seja, a avaliação concentrou-se apenas nos processos de fabricação, excluindo, assim, o uso, manutenção e destinação após fim de vida do produto. Os processos considerados nesse estudo podem ser observados na Figura 4.11. O Inventário do estudo foi tirado e adaptado da literatura. Os resultados mostraram que, no parâmetro Demanda de Energia Acumulada, a produção de Silício metalúrgico é responsável pela maior demanda energética, correspondendo a 47% de contribuição contra 21% da fabricação do módulo fotovoltaico. Os processos que mais contribuiriam para esses potenciais impactos foram, de forma decrescente, a fabricação de módulo fotovoltaico, produção de silício metalúrgico e a produção de *wafer*.

Figura 5.1 - Processos incluídos no estudo de ACV de Marques



FONTE: Bezerra et al, 2018

Daniela-Abigail *et al*, estudaram ACV de módulos fotovoltaicos considerando o ciclo de vida completo – do “berço ao túmulo”. Na sua abordagem incluíram 2 cenários diferentes de fim de vida dos painéis: aterro e reciclagem. O estudo demonstrou que o cenário da reciclagem de módulos fotovoltaicos teve um desempenho superior em todas as categorias de impactos avaliadas em comparação com o cenário de descarte em aterro. Essa melhoria de indicadores pode ser observada na Tabela 4.1. Os autores apontaram também a etapa de obtenção de silício e processamento de silício grau solar e de células fotovoltaicas contribuem significativamente para o impacto ambiental devido sua alta demanda em eletricidade, água e recursos minerais (Daniela *et al*, 2024).

Tabela 4.2 - Percentual de redução dos impactos ambientais alcançados pelo caso da reciclagem

| <b>Categoria de Impacto</b>               | <b>Unidade</b>                 | <b>Caso I (Aterro)</b> | <b>Caso II (Reciclagem)</b> | <b>Melhoria nos indicadores ambientais (%)</b> |
|---|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|--|
| Aquecimento global                        | Kg de CO <sub>2</sub> eq.      | 789,89                 | 593,03                      | 25,68  |
| Depleção de ozônio estratosférico         | Kg de CFC-11                   | 0,0004                 | 0,0003                      | 22,02  |
| Radiação ionizante                        | kBq de Co-60 eq.               | 39,71                  | 38,17                       | 3,88   |
| Formação de ozônio, saúde humana          | kg de NO <sub>x</sub> eq.      | 3,37                   | 2,47                        | 26,53  |
| Formação de partículas finas de matéria   | Kg de PM <sub>2.5</sub> eq     | 1,70                   | 1,26                        | 25,85  |
| Formação de ozônio, ecossistema terrestre | kg de NO <sub>x</sub> eq.      | 3,47                   | 2,56                        | 26,16  |
| Acidificação terrestre                    | kg de SO <sub>2</sub> eq.      | 4,22                   | 3,25                        | 22,89  |
| Eutrofização de água doce                 | kg de P eq.                    | 0,2228                 | 0,1886                      | 15,34  |
| Eutrofização marinha                      | kg de N eq.                    | 0,0318                 | 0,0277                      | 12,88  |
| Ecotoxicidade terrestre                   | kg de 1,4-DCB                  | 7033,37                | 5982,96                     | 14,93  |
| Ecotoxicidade de água doce                | kg de 1,4-DCB                  | 2,69                   | 1,63                        | 39,28  |
| Ecotoxicidade marinha                     | kg de 1,4-DCB                  | 85,44                  | 36,07                       | 57,78  |
| Toxicidade cancerígena humana             | kg de 1,4-DCB                  | 22,38                  | 18,37                       | 17,91  |
| Toxicidade não cancerígena humana         | kg de 1,4-DCB                  | 758,35                 | 547,26                      | 27,84  |
| Uso de terra                              | m <sup>2</sup> de colheita eq. | 15,18                  | 10,33                       | 31,95  |
| Escassez de recursos minerais             | kg de Cu eq.                   | 28,46                  | 14,30                       | 49,74  |
| Escassez de recursos fósseis              | kg de óleo eq.                 | 208,32                 | 156,36                      | 24,94  |
| Consumo de água                           | m <sup>3</sup>                 | 29,77                  | 28,05                       | 5,78   |

FONTE: Daniela-Abigail, 2024

Apesar da abrangência desses estudos, as suas fronteiras do sistema não consideraram a reciclagem ou a complexidade e diversidade dos processos de reciclagem desses equipamentos. Um estudo de ACV de reciclagem de painéis solares que analise com detalhe os processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos pode contribuir para melhorar a eficiência e diminuir seus impactos ambientais contribuindo assim em melhorar os indicadores ambientais relacionados à extração e processamento de silício. Essa expectativa é coerente com os resultados do trabalho de Daniela-Abigail *et al.*

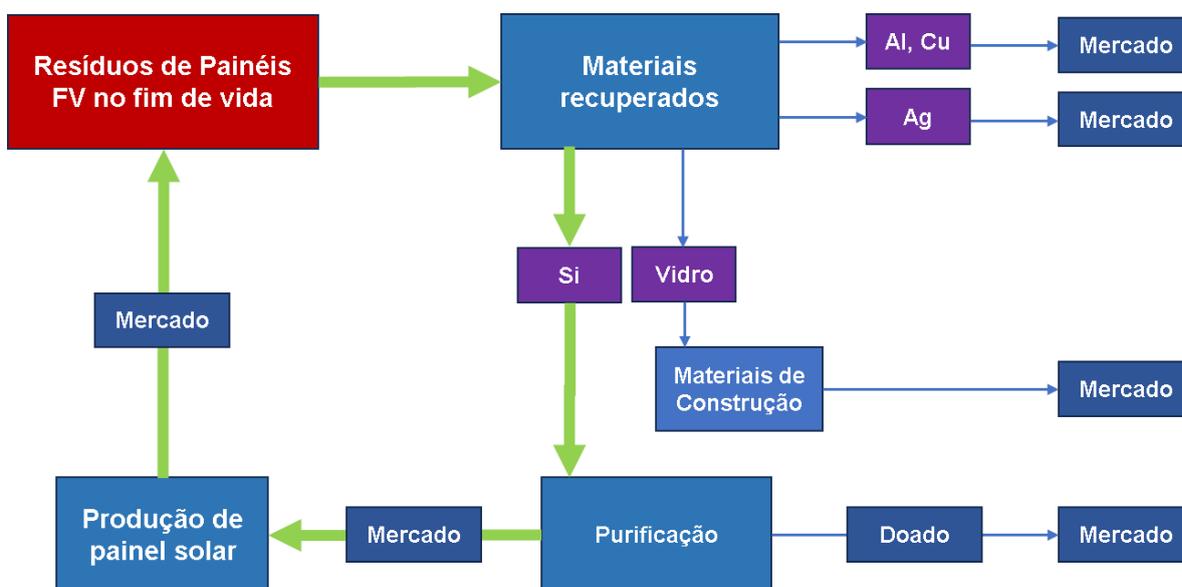
## 5.1 ACV DE PROCESSO DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Nesta seção são apresentados estudos de ACV de processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Foram identificados alguns estudos sobre a temática – a maioria realizados na Europa. Percebeu-se uma grande concentração desses estudos na Itália. Ao investigar, descobriu-se que nesse país opera algumas plantas de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Assim filtrou-se estudos de ACV de reciclagem de módulos fotovoltaicos dessas plantas. Dessa forma, foram identificados e selecionados processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos praticados em duas plantas de nível TRL7: ReSiELP e FRELP, ambas na Itália.

### 5.1.1. Processo ReSiELP

ReSiELP (*Recovery of Silicon and other materials from End-of-Life Photovoltaic Panels*) é um projeto europeu financiado pelo Instituto Europeu de Inovação e Tecnologia (EIT) e que possui parcerias com universidades e Institutos de Pesquisa com objetivo de fomentar a economia circular por meio da reciclagem de painéis solares no estado de fim de vida útil (RESIELP, 2024). Para isso, desenvolveu um processo inovador termomecânico-hidrometalúrgico de desperdício zero de reciclagem de módulos fotovoltaicos com o objetivo central de recuperar e purificar silício para ser reutilizado como matéria-prima para produção de painel solar. Além de silício, há recuperação de prata, alumínio, cobre e vidro (Figura 5.1). O vidro reciclado é utilizado como matéria-prima num processo inovador de fabricação de pré-moldados usados na construção civil (CERCHIER, 2021).

Figura 5.1 - Conceito do processo ReSiELP



Fonte: Adaptado de Cerchier, 2021

O projeto possui uma planta piloto na Itália. Conforme mostra a Figura 5.2, o sistema de reciclagem é composto por dois subsistemas: (1) linha de recuperação e (2) linha de reaproveitamento de vidro. Na linha de recuperação localizada na cidade de Milão, o painel fotovoltaico no fim de vida é tratado para recuperação de silício, prata, cobre, alumínio e vidro. O vidro recuperado é transportado para a outra instalação – linha de reaproveitamento de vidro – na cidade italiana de Brindisi para a produção de pré-moldados usados na construção civil (ANSANELLI, 2021). Para o objetivo deste trabalho será analisado apenas os processos envolvendo a planta de recuperação.

O processo de recuperação envolve: (1) desmontagem e corte, (2) tratamento térmico, (3) separação dos materiais, (4) tratamentos químicos e (5) recuperação dos materiais (CERCHIER, 2021):

*Desmontagem e corte:*

Nesta etapa, remove-se manualmente, caixa de junção e cabos CC e o módulo é cortado no meio.

*Tratamento térmico:*

Nessa etapa, o material cortado passa por aquecimento a uma temperatura de entre 450 °C e 550 °C durante 20 a 30 minutos para queimar as partes poliméricas (EVA e folha traseira) e facilitar a separação dos materiais.

#### *Separação de materiais:*

Esta etapa tem como objetivo separar o principal material células de silício do vidro e de cobre.

#### *Tratamento químico:*

As células de silício separadas na etapa anterior ainda contêm alumínio e prata. Nesta etapa a pasta de alumínio é removido usando, geralmente, solução de hidróxido de sódio e, em seguida, solução de ácido nítrico para remoção dos contatos de prata.

#### *Recuperação dos materiais:*

Nesta etapa, as concentrações de sólidos nas soluções passam por processos físicos como sedimentação e filtração e por outros processos químicos para alteração de pH e consequente precipitação. Com isso, é possível recuperar os diferentes sólidos: silício, prata e alumínio.

Ansanelli *et al* (2021), realizaram um dos estudos mais recente ACV de reciclagem de módulos fotovoltaicos de um processo industrial. O estudo foi realizado sobre duas plantas do ReSiELP e inclui tanto o impacto ambiental do processo de reciclagem como os impactos evitados em decorrência da recirculação dos materiais reciclados. Os pesquisadores definiram como unidade funcional a produtividade anual estimada do processo de reciclagem de 24 toneladas de painéis solares c-Si no fim de vida.

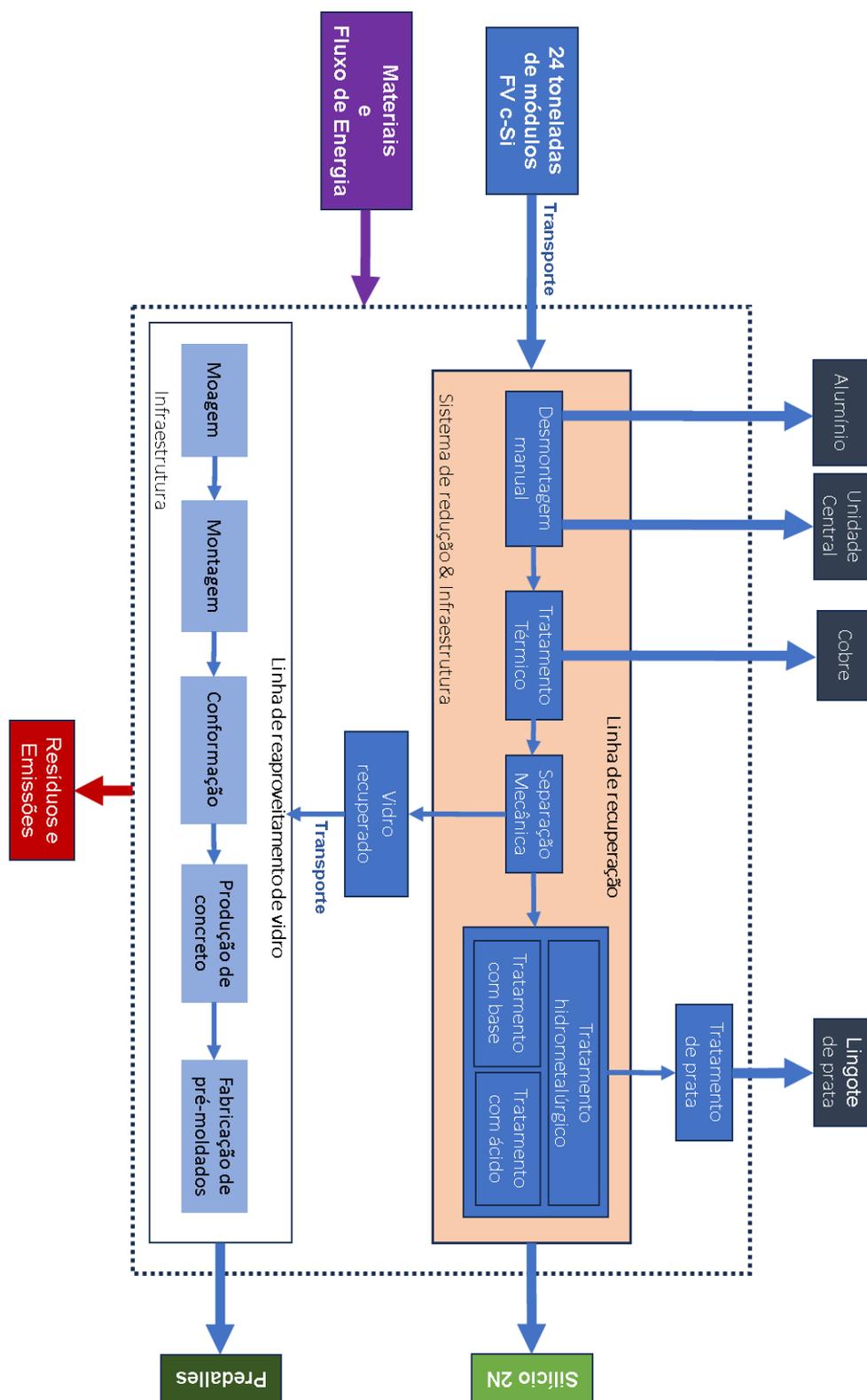
Para delimitação das fronteiras do sistema (Figura 5.2), e considerando o objetivo, os autores adotaram análise *gate-to-gate*. Ou seja, considerou os impactos ambientais desde a entrega dos módulos na instalação de reciclagem até a separação dos componentes e eliminação dos resíduos. Porém, foram incluídos transportes dos painéis solares de diferentes pontos de recolha dentro do território italiano para a planta de recuperação. O sistema foi formado por dois subsistemas: linha de recuperação e reutilização de vidro. Para fins de comparação com outro processo de reciclagem, a análise será concentrada no subsistema planta de recuperação.

Os dados do inventário da ACV foram coletados nos locais (dados primários), tirados de fontes bibliográficas e do banco de dados *EcoInvent v. 3.5*.

Para avaliação de ciclo de vida, os autores usaram o software *SimaPro v.9.0.0.48* e método *ReCiPe midpoint*. As categorias avaliadas são: Aquecimento Global (AG), Formação de Partículas Finas (FPF), Formação de Ozônio (FO), Acidificação Terrestre (AT), Eutrofização de Água Doce (EAD), Eutrofização Marinha (EM),

Toxicidade Humana Cancerígeno (THC), Escassez de Recursos Minerais (ERM), Escassez de Recursos Fósseis (ERF) e Consumo de Água (CA).

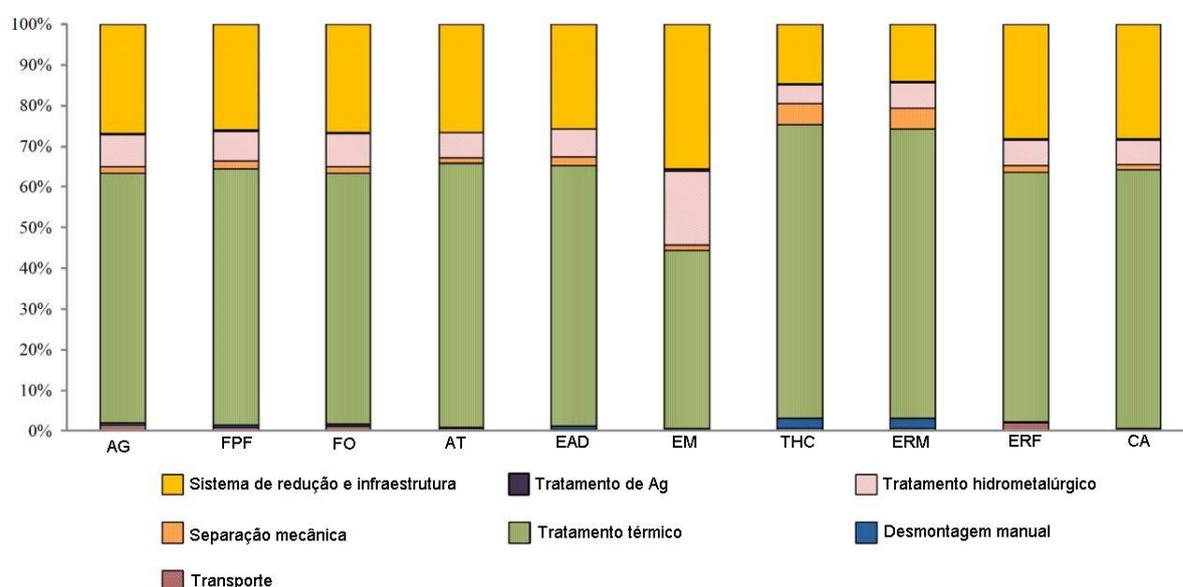
Figura 5.2 - Sistema de ACV: ReSiELP



Fonte: Autor (Adaptado de ANSANELLI, 2021)

O resultado do estudo identificou que, na planta de recuperação, em todas as categorias analisadas, as maiores cargas ambientais são devido a energia elétrica utilizada para o tratamento térmico e que uso de soluções químicas no processo hidrometalúrgico também gera cargas ambientais significativas (Figura 5.2). Os pesquisadores concluíram que a dependência da rede elétrica que possui uma matriz majoritariamente de fontes não renováveis foi fundamental pelo alto impacto do processo de tratamento térmico em forno elétrico. O transporte também teve uma participação significativa devido a distância entre as duas plantas.

Figura 5.3 - Processo ReSiELP: porcentagem de contribuição de cada etapa da planta de recuperação para cada categoria de impacto



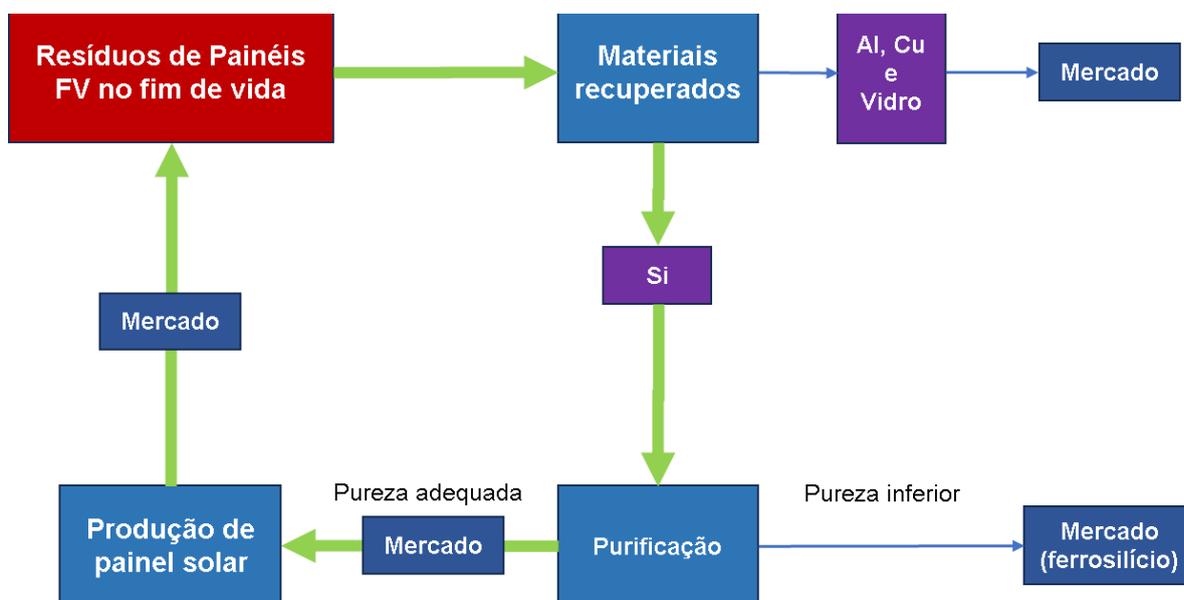
Fonte: adaptado de Ansanelli *et al*

### 5.1.2. Processo FREL P

O *Full Recovery End of Life Photovoltaic Project (FREL P)*, é um projeto de pesquisa da empresa italiana SASIL SpA financiado pelo programa LIFE da União Europeia e desenvolvido em parceria com *PV Cycle Italy*. FREL P tem como objetivo de maximizar a reciclagem de diferentes frações de materiais incorporados nos módulos fotovoltaicos de silício para atender a Diretiva WEEE da União Europeia (Figura 5.3). O processo de reciclagem desenvolvido foi primeiramente numa planta piloto e, posteriormente, aplicado numa planta de escala industrial instalada na cidade italiana de Piemonte com capacidade de reciclar 8000 toneladas de painéis fotovoltaicos por ano. Esse processo combina processos químicos e mecânicos para separar cada material e recuperar a maior parte do painel. Inclui processos como a desmontagem

de cabos (incineração de cabos), separação e refinamento de vidro, corte de células e incineração, peneiramento de cinzas de incineração, lixiviação ácida, filtração, eletrólise, neutralização e filtro prensa (Figura 5.4).

Figura 5.4 - Conceito FREL P

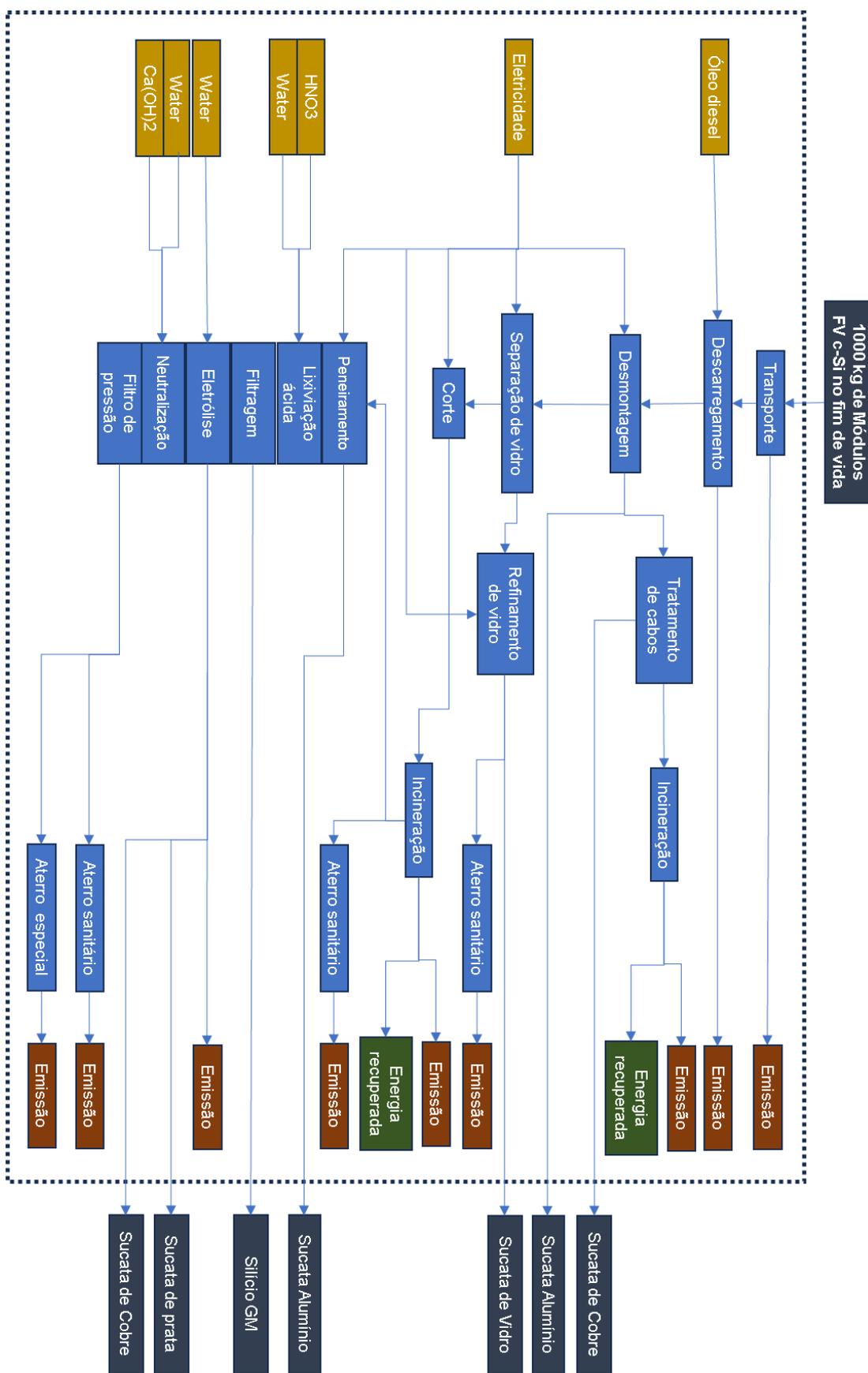


FONTE: Elaborado pelo autor

Os autores Latunussa *et al* (2016), realizaram um dos estudos mais detalhado de Avaliação de Ciclo de Vida de reciclagem de painéis solares. O estudo foi feito sobre o processo FREL P operado na planta piloto em Piemonte. Os autores definiram como Unidade Funcional 1000 kg de resíduos de módulos fotovoltaicos p-Si com a composição de massa de acordo com a Tabela 4.1. O inventário foi elaborado de acordo com análise direta dos resíduos e a avaliação do impacto foi modelada com o software SimaPro v.8.

Nos últimos anos, o processo de reciclagem FREL P foi otimizado para mais recuperação com algumas modificações. O processo então reverte o processo básico FREL P, que é a neutralização e depois o filtro de pressão (SINGH, 2021).

Figura 5.5 - Sistema de ACV: processo FREL P



Fonte: adaptado de LATUNUSSA *et al*, 2016

Os resultados mostraram que em todas as categorias de impactos considerados, as principais contribuições estão relacionadas com o transporte dos painéis para o local, os processos de incineração e os processos hidrometalúrgicos.

### 5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da observação desses estudos foi possível elaborar quadros comparativos para os dois processos de reciclagem e seus respectivos estudos de ACV, conforme o Quadro 5.1 e Quadro 5.2. Nesta seção serão destacados alguns aspectos que tiveram efeitos significativos nos resultados de avaliação de impacto ambiental.

O uso de um sistema infravermelho de ondas curtas e médias pelo ReSiELP contribuiu para a minimização dos impactos ambientais relacionados ao processo tratamento térmico. Essa radiação penetra mais profundamente nos materiais e é rapidamente absorvida, o que resulta em um aquecimento rápido e eficiente. É ideal para processos que requerem aquecimento rápido e alta intensidade.

Embora estabeleceram como critério de delimitação de fronteiras o conceito *gate-to-gate*, os dois estudos consideraram o transporte dos módulos dos pontos de coleta até os pontos de reciclagem. Latunussa *et al*, consideraram também o transporte entre os locais de descomissionamento e os pontos de coleta.

Quadro 5.1 - Comparação entre técnicas usadas em cada etapa dos processos ReSiELP e FRELP

| Processo                    | Técnica usada   |  |
|-----------------------------|---|--|
|                             | ReSiELP   | FRELP  |
| Desmontagem e corte         | Manual  | Mecânica   |
| Tratamento Térmico          | Forno Elétrico  | Sistema Infravermelho  |
| Separação                   | Mecânica  | Mecânica   |
| Tratamento Hidrometalúrgico | Tratamento ácido com HNO <sub>3</sub> e básica com NaOH | Tratamento ácido com HNO <sub>3</sub> , eletrólise, Neutralização com CaOH |

Fonte: Autor

Os dois estudos definiram como unidade funcional a “massa de módulos fotovoltaicos de c-Si no fim de vida útil”.

Quadro 5.2 - Comparação entre os estudos de ACVs de Ansanelli (ReSiELP) e de Latunussa et al (FRELP)

| ETAPAS DE ACV  |  | RESIELP (Itália)                                    | FRELP (Itália)                              |
|--|--|---|---|
| Definição do objetivo e escopo   | Fronteira do sistema                                     | Transporte  | Transporte                                  |
|  |  | Desmontagem manual                                  | Descarregamento                             |
|  |  | Tratamento térmico                                  | Desmontagem manual                          |
|  |  | Separação mecânica                                  | Incineração de cabos e <i>wafers</i>        |
|  |  | Tratamento hidrometalúrgico                         | Separação de vidro                          |
|  |  | Tratamento de prata                                 | Tratamento hidrometalúrgico                 |
|  | Categorias de impacto avaliadas                          | Aquecimento Global                                  | Esgotamento de recursos abióticos fósseis   |
|  |  | Formação de Partículas Finas                        | Demanda acumulada de energia                |
|  |  | Formação de Ozônio (FO)                             | Formação de ozônio fotoquímico              |
|  |  | Acidificação Terrestre (AT)                         | Acidificação                                |
|  |  | Eutrofização de água doce (EAD)                     | Eutrofização de água doce                   |
|  |  | Eutrofização marinha (EM)                           | Eutrofização Marinha                        |
|  |  | Toxicidade com efeito cancerígeno no humanos (TCH)  | Toxicidade humana, efeitos cancerígenos     |
|  |  | Economia de recursos minerais (MRS)                 | Eutrofização terrestre                      |
|  |  | Economia de recursos fósseis (ERF)                  | Radiação Ionizante de Ecossistemas          |
|  |  | Consumo de água (CA)                                | Radiação Ionizante a saúde humana           |
|  |  |   | Formação de partículas finas                |
|  |  |   | Toxicidade humana, efeitos não cancerígenos |
|  |  |   | Ecotoxicidade de água doce                  |
|  |  | Destruição de Ozônio                                |   |
|  | Alterações Climáticas                                    |   |   |
| Unidade Funcional  | 24 toneladas de painéis solares c-Si no fim de vida útil | 1000 kg de painéis solares c-Si do fim de vida útil |   |
| Análise de inventário  | Fontes de dados do Inventário                            | Dados primários                                     | Dados primários                             |
|  |  | Estimativas   | Estimativas                                 |
|  |  | Bibliografia  | Bibliografia                                |
| Avaliação de impacto e interpretação de resultados                                       | Método de avaliação                                      | ReCiPe 2016 <i>midpoint</i>                         | ReCiPe (?) <i>midpoint</i>                  |
|  | Softwares utilizados                                     | SimaPro v.9   | SimaPro v.8                                 |
|  | Etapas com maiores impactos                              | Tratamento térmico                                  | Transporte                                  |
|  |  | Sistema de incineração                              | Incineração                                 |
|  |  | Tratamento hidrometalúrgico                         | Tratamento hidrometalúrgico                 |
|  | Recomendações  | Consumo eficiente de energia elétrica               | Criação de usinas descentralizadas          |
|  |  | Uso de fontes renováveis                            |   |
| Redução de uso e substituição de soluções ácidas e básicas por reagentes mais ecológicos |  |   |   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A escolha de massa, dentre vários outros parâmetros, como referência para unidade funcional vai ao encontro das recomendações do Manual para Avaliação do Ciclo de Vida (ILCD Handbook, 2010) e da ABNT NBR ISO 14040:2009, pois se trata de uma propriedade quantificável e qualificável a qual cada todas as entradas e saídas podem ser relacionadas. Nesse caso, quantificação é “kg de painéis” e as qualificações são: “módulos fotovoltaicos de c-Si” e “fim de vida útil”. Assim, esses estudos não poderiam ser comparados se um deles tivesse avaliado “módulos fotovoltaicos de Telureto de Cádmio (CdTe)”. Por outro lado, nenhum dos estudos fez referência ao efeito da idade e condição de conservação dos módulos. Isso sugere que o qualificador “fim de vida útil” não possui efeito significativo para impactar o resultado, tornando-o prescindível.

Para os processos estudados, percebe-se que dentre as características quantificáveis dos módulos, a massa é a mais relevante numa indústria de reciclagem de módulos fotovoltaicos, pois, ela é a referência para as operações de compra, transporte e tratamento.

Nos dois estudos, a incineração dos polímeros teve impactos consideráveis, porém, esses impactos são creditados através do sistema de recuperação de energia derivada de combustão de polímeros das duas unidades (Latunussa *et al*, 2016; Ansanelli *et al*, 2021).

Com relação aos processos, comparativamente observou-se que ReSiELP possui como etapa crítica o tratamento térmico e FRELP, o tratamento hidrometalúrgico devido ao uso várias substâncias químicas.

Percebe-se no estudo de Latunussa uma grandeza de detalhes de fluxo de massa e de energia dos processos na delimitação de fronteira. Esse detalhamento foi importante no rastreamento dos fluxos de massa e de energia. A escolha de massa e não a quantidade numérica ou potência elétrica como unidade funcional nos dois estudos é prático pois permite trabalhar com um parâmetro determinante nos impactos ambientais de painéis solares, além de ser uma base comum e facilmente comparável com outros estudos, pois quando esses resíduos chegam a uma planta de reciclagem, a massa é o parâmetro de troca e de operação. Como mencionado pelos autores a ausência de alguns dados pode ter impactado a precisão dos resultados obtidos.

O tratamento hidrometalúrgico nos dois estudos apresentou impactos relativamente baixas

Foi possível cruzar e comparar vários aspectos dos dois processos e seus respectivos estudos, porém, não é possível concluir qual dos dois processos é mais impactante. Porque, segundo a recomendação de ILCD Handbook, uma comparação precisa é possível quando os dois sistemas compartilham a mesma unidade funcional, mesmas categorias de impacto, bancos de dados semelhantes. Por exemplo, Latunussa incluiu a categoria Eutrofização Terrestre (categoria ausente no trabalho de Ansanelli) e concluiu que 80% do seu impacto é devido a tratamento hidrometalúrgico.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conforme indicado inicialmente o objetivo deste estudo foi identificar e analisar estudos de Avaliação de Ciclo de Vida de processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino.

Nesta investigação foi possível identificar dois processos de reciclagem em nível avançado de maturidade tecnológica (TRL). Tanto o processo ReSiELP como FRELPE possuem TRL 7 na altura que os respectivos estudos foram feitos. Além disso, identificou-se, para cada um dos processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos, um estudo detalhado que engloba no sistema unicamente ou cabalmente o processo de reciclagem. Os dois estudos (Latunussa, 2016 e Ansanelli, 2021) permitiram uma análise comparativa pois possuem a mesma referência de unidade funcional, localidade geográfica das plantas, mesmo objeto de estudo, mesmos mecanismos de obtenção de dados, categorias de impactos semelhantes e mesmo software.

A análise desses estudos traz à tona o potencial de impacto causado por técnicas de tratamento térmico em fornos devido a alta demanda de energia e do fato que muitos países ainda possuem uma matriz elétrica predominantemente não renovável. Técnicas de aquecimento mais eficientes como sistema de infravermelho de ondas curtas e médias devem ser avaliadas pelas indústrias e centros de pesquisa de reciclagem de módulos fotovoltaicos.

A massa é um parâmetro prático para definição de unidade funcional, pois, permeia todo o sistema. Ou seja, a ela todas as entradas e saídas podem ser relacionadas. A massa deve ser qualificada por tipo de tecnologia dos módulos fotovoltaicos.

Devido a algumas limitações como a falta de detalhamento dos processos

operacionais do ReSiELP e falta de dados concretos sobre transporte, não possível definir um dos processos como mais eficiente. Em linhas gerais FREL P se destacou no uso de sistema inovador de infravermelho de ondas curtas e médias no tratamento térmico.

Para estudos futuros, sugere-se um estudo comparativo de Avaliação de Ciclo de Vida dos processos ReSiELP e FREL P no nível atual TR7 e posteriormente no nível industrial (TRL9); e uma investigação sobre estado de arte de ACV de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício por meio de bibliometria.

Frelp não falou do investimento inicial para o processo de aquecimento infravermelho... pilotos podem servir de modelo para implementação em outros países como o Brasil. Sugere-se um estudo de ACV comparativo dos dois processos.

## REFERÊNCIAS

EIA. U.S. **Energy Information Administration**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/>>. Data de acesso: 13/04/2023.

**Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. , [s.d.].

MARQUES, P. A. et al. Avaliação Ambiental de Ciclo de Vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2 esp., 2018.

BEZERRA, J. L., LIRA, M. A. T., SILVA, E. A. Avaliação de Ciclo de Vida aplicada a painéis fotovoltaicos. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado-RS**, abril 2018.

VILLALVA, M.G. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. – 2ª ed. Ver. E atual. – São Paulo: Érica, 2015

MAANI, T., et al. **Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CdTe) solar panels**. Science of the Total Environment. Elsevier Science, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720323445>>. Acesso em 13 de julho de 2024.

SILVA, E. P. **Fontes renováveis de energia: produção de energia para um desenvolvimento sustentável**. – 1ª ed. – São Paulo: Livraria da Física, 2014.

D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. – 1ª ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2015

MILLER, G. T.; SPOOLMAN, S. E. **Ecologia e sustentabilidade**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B., OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SANCHÉZ, L. H. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008

OMETTO, A. R. et al. A gestão Ambiental nos Sistemas Produtivos. **Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção** N° 6, pp. 22 – 36. Jun. 2007.

DATHEIN, R. **Inovação e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX**. Publicações

DECON Textos Didáticos 02/2003. DECON/UFRGS, Porto Alegre, fevereiro 2003

DIAS, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares)**. Orientador: Hugo Marcelo Veit. 2015. p. 83. Dissertação: (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais; Escola de Engenharia; Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

COARITI, J. R. **Análise dos Efeitos da Radiação Solar Ultravioleta (R-UV) em Populações Habitante a Diferentes Altitudes**. Orientador: Dr. Marcelo de Paula Corrêa. Dissertação: Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Instituto de Recursos Naturais; Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá, 2011.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. GEPEA – Grupo de Energia. Manual de Disciplina. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

LIMA, A., MENEZES, N., *et al.* **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol 42, 2020.

SOUZA, R. B. **Interação das radiações eletromagnéticas com a matéria: conceitos de Física Moderna propelidos por jogos pedagógicos em um pano de fundo clássico**. Orientador: Prof. Dr. Luizdarcy Matos Castro. Dissertação: Mestrado em Ensino de Física. Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF); Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Vitória da Conquista, 2019.

PILIPPI JR, A., REIS, L. B. **Energia e Sustentabilidade**. Barueri, SP: Manole, 2016. Coleção Ambiental, v. 19

COLTRO, L. (Organização). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

GIL, L., ISIDRO, J. **O fim de vida dos módulos fotovoltaicos**. Dossier sobre solar fotovoltaico. Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). Lisboa.

MÜLLER, A., *et al.* **A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory**. Solar Energy Materials & Solar Cells. Elsevier Science, 2021. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em 13 de janeiro de 2023.

COELHO, T. F., SERRA, J. C. V. **Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais**. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade. V. 15, n. 7. Curitiba, 2018

ANSANELLI, G. *et al.* **A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels**. Applied Energy. Elsevier Science, 2021. Disponível

em: < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em 24 de dezembro de 2023.

LATUNUSSA, C. E. L., *et al.* **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels.** *Solar Energy Materials & Solar Cells* 156 (2016), pp. 101-111. Elsevier Science, 2016. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em 10 de março de 2023.

MENDES, N. C., *et al.* **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos.** São Paulo, 2015.

TIAN, X., *et al.* **Life cycle assessment of recycling strategies for perovskite photovoltaic modules.** *Nat Sustain* 4, 821–829 (2021). Disponível em <<https://doi.org/10.1038/s41893-021-00737-z>>. Acesso em 02 jul. 2023.

BÜLLER, A. J. *et al.* Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII*, 2018, Gramado, RS.

ELY, F., SWART, J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **Setor Elétrico**, 105<sup>a</sup> Edição, pp. 138-9, out. 2014. Disponível em: <[https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ed-105\\_outubro\\_2014](https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ed-105_outubro_2014)>. Data de acesso: 28/06/2023.

CAMPOLINA, J. M. *et al.* Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGET/UFSM)**, Santa Maria-RS, n. 2, V. 19, mai-ago 2015, pp. 735-750. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/361239271\\_UMA\\_REVISAO\\_DE\\_LITERATURA\\_SOBRE\\_SOFTWARES\\_UTILIZADOS\\_EM\\_ESTUDOS\\_DE\\_AVALIACAO\\_DO\\_CICLO\\_DE\\_VIDA](https://www.researchgate.net/publication/361239271_UMA_REVISAO_DE_LITERATURA_SOBRE_SOFTWARES_UTILIZADOS_EM_ESTUDOS_DE_AVALIACAO_DO_CICLO_DE_VIDA)>. Data de acesso: 28/06/2023.

GOEDKOOP, M.; SCHRYVER, A. D.; OELE, M.; DURKSZ, S.; ROEST, D. **Introduction to LCA with SimaPro 7.** USA, PRé Consultants, 2010. p.88.

SINGH, J. K. D. *et al.* Life Cycle Assessment of Disposed and Recycled End-of-Life Photovoltaic Panels in Australia. **Sustainability**, Sydney, out. 2021.

AZEUMOA, M. F. *et al.* **Photovoltaic module recycling, a physical and a Chemical recovery process.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193 (2019) 314-319. Elsevier Science, 2019. Disponível em: <[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024819300510?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=8db1bbb8392e1ac0](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024819300510?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=8db1bbb8392e1ac0)>. Acesso em 12 de setembro de 2024.

CERCHIER, P. **Innovative recycling of end of life silicon PV panels: RESIELP.** *Detritus: Multidisciplinary Journal for Waste Resources & Residues*, 2021. Disponível em: <<https://digital.detritusjournal.com/articles/innovative-recycling-of-end-of-life->

[silicon-pv-panels-resielp/1429](https://www.resielp.eu/Pages/ProjectOverview)>. Acesso em 12 de agosto de 2024.

RESIELP. Project overview. Disponível em: <<https://www.resielp.eu/Pages/ProjectOverview>>. Acesso em 14 de janeiro de 2024.

IRENA; IEA-PVPS. **End-of-Life management: solar photovoltaic panels.** International Renewable Energy Agency na International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA IEAPVPS End-of-Life Solar PV Panels 2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf)>. Acesso em 12 de agosto de 2024.

DANIELA-ABIGAIL, H-L. *et al.* **Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy** Renewable Energy Focus, 51 (2024) 100649. Elsevier Science, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008424001133>>. Acesso em 17 de novembro de 2024.

RAMÍREZ-CANTERO, J. *et al.* **State of the art of end-of-life silicon-based solar panels recycling with a bibliometric perspective.** Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 281 (2025) 113312. Elsevier Science, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702482400624X>>. Acesso em 21 de novembro de 2024.