

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS,
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SERVIÇO SOCIAL

FELIPE ANDRADE DE ARAÚJO

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

ITUIUTABA
2026

FELIPE ANDRADE DE ARAÚJO

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Administração, Ciências
Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço
Social da Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Profa. Dra. Mara Rubia da Silva
Miranda

ITUIUTABA

2026

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Administração, Ciências
Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço
Social da Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Produção.

Ituiutaba, 02 de Fevereiro 2026.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Mara Rubia da Silva Miranda (orientador), Universidade Federal de Uberlândia.

Prof. Dr. Lúcio Abiamel Medrano Castillo, Universidade Federal de Uberlândia.

Prof. Dr. Jefferson Gomes do Nascimento, Universidade Federal de Uberlândia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Marlene e Eloi, pelo apoio constante, pelos valores transmitidos e por nunca medirem esforços para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha formação acadêmica.

À minha namorada, Marina, pelo incentivo diário, pela compreensão e pelo apoio nos momentos em que a rotina se tornou mais intensa e desafiadora, sendo fundamental para a manutenção da motivação ao longo desse percurso.

Aos meus amigos Caique e João, que, mesmo à distância, sempre estiveram presentes e dispostos a ajudar, e ao Guilherme, com quem tive a oportunidade de morar, pela convivência, apoio diário e ajuda constante ao longo desse período.

Agradeço também a todos os amigos que fiz em Ituiutaba, que contribuíram de maneira significativa, especialmente nos momentos mais desafiadores dessa caminhada, tornando essa etapa mais leve e possível.

À minha orientadora, pela disponibilidade, orientações e contribuições técnicas que foram essenciais para o desenvolvimento e a consolidação deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha psicóloga, Fernanda Cubas, pelo apoio fundamental ao longo desse período, contribuindo de forma significativa tanto para meu desenvolvimento pessoal quanto profissional.

RESUMO

A expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil, impulsionada pela geração distribuída e por políticas públicas, torna necessária a avaliação de seus impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma metodologia consolidada para analisar impactos ambientais desde a extração de matérias-primas até o fim de vida útil, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044. Este trabalho investiga o ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, identificando a distribuição dos impactos ambientais nas fases de fabricação, instalação, operação e destinação final, bem como comparando diferentes tecnologias. A metodologia adotada caracteriza-se como pesquisa aplicada, fundamentada em revisão bibliográfica e documental, com abordagem qualitativa e apoio de dados quantitativos. Os resultados indicam que os maiores impactos concentram-se nas etapas de manufatura e fim de vida, enquanto a fase de operação apresenta impactos reduzidos, evidenciando que, ao longo de sua vida útil, os sistemas fotovoltaicos apresentam desempenho ambiental superior às fontes convencionais de geração de energia.

Embora os sistemas fotovoltaicos apresentem impactos ambientais relevantes, especialmente associados às etapas de extração de matérias-primas e manufatura dos módulos, esses impactos devem ser analisados de forma contextualizada. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida demonstram que, quando comparados a fontes convencionais de geração de energia, como carvão mineral, petróleo e gás natural, os impactos ambientais dos sistemas fotovoltaicos são significativamente inferiores, sobretudo no que se refere às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo de recursos ao longo da fase de operação. Além disso, o tempo de retorno energético relativamente curto, em comparação à vida útil dos módulos, indica que a energia produzida ao longo de décadas de funcionamento supera amplamente a energia e os recursos consumidos em sua fabricação. Dessa forma, embora não sejam isentos de impactos, os sistemas fotovoltaicos não representam um fator ambiental preocupante quando analisados sob a perspectiva do ciclo de vida, configurando-se como uma alternativa ambientalmente mais sustentável em relação às fontes convencionais de geração de energia.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Avaliação do ciclo de vida. Sustentabilidade. Impactos ambientais.

ABSTRACT

The expansion of photovoltaic solar energy in Brazil, driven by distributed generation and public policies, highlights the need to assess its environmental impacts throughout the life cycle. In this context, Life Cycle Assessment (LCA) is a consolidated methodology for evaluating environmental impacts from raw material extraction to end-of-life, according to ISO 14040 and ISO 14044 standards. This study investigates the life cycle of photovoltaic systems, identifying the distribution of environmental impacts across manufacturing, installation, operation, and disposal stages, as well as comparing different technologies. The methodology is characterized as applied research, based on bibliographic and document review, using a qualitative approach supported by quantitative data. The results show that the main impacts occur during manufacturing and end-of-life stages, while the operation phase presents low impacts, demonstrating that photovoltaic systems exhibit superior environmental performance compared to conventional energy sources over their lifetime.

Although photovoltaic systems present relevant environmental impacts, especially those associated with the raw material extraction and module manufacturing stages, these impacts must be analyzed in a contextualized manner. Life Cycle Assessment studies demonstrate that, when compared to conventional energy generation sources such as coal, oil, and natural gas, the environmental impacts of photovoltaic systems are significantly lower, particularly with regard to greenhouse gas emissions and resource consumption during the operation phase. Furthermore, the relatively short energy payback time in comparison to the modules' service life indicates that the energy produced over decades of operation largely exceeds the energy and resources consumed during manufacturing. Therefore, although not impact-free, photovoltaic systems do not represent a concerning environmental factor when assessed from a life cycle perspective, constituting a more environmentally sustainable alternative compared to conventional energy generation sources.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Life cycle assessment. Sustainability. Environmental impacts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Estrutura da avaliação de ciclo de vida.....	7
Figura 2– Componentes de um painel fotovoltaicos.....	13
Figura 3– Representação da média de materiais que compõem um módulo fotovoltaico.	15
Figura 4– Cadeia de Valor de fabricação na industria fotovoltaica, principais resíduos identificados (quartzo quebrado e Silício perdido no corte).	16
Figura 5–ciclo de vida do silício para painel fotovoltaico.	16
Figura 6– Ciclo de vida de um painel fotovoltaico.	17
Figura 7– Matriz Elétrica Brasileira.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição estrutural de módulos fotovoltaicos e distribuição percentual de custos.....	14
Tabela 2 – Principais impactos ambientais associados à implantação de usinas solares fotovoltaicas.	20
Tabela 3 - Matriz de responsabilidades na logística reversa de módulos fotovoltaicos.....	27

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
EVA	Etileno-vinil-acetato
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	International Organization for Standardization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	3
2.1.1 Contexto histórico	5
2.1.2 Evolução da ACV e sua Ampla Utilização.....	5
2.1.3 ACV no Brasil.....	6
2.1.4 Conceitos chave.....	7
2.1.5 A Energia Solar.....	8
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL	9
2.2.1 A Energia Solar no Brasil	10
2.2.2 A Energia Fotovoltaica	11
2.2.3 Comparação entre Tecnologias Fotovoltaicas sob a Perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida.....	11
3 METODOLOGIA.....	12
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.1 IMPACTOS AMBIENTAIS	18
4.2 ANALISE DOS RESULTADOS	21
4.3 MATRIZ DE COMPARAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA X HIDRELÉTRICA X TERMOELÉTRICA	22
4.4 RECICLAGEM E REAPROVEITAMENTO DE PAINÉIS.....	25
4.5 LEGISLAÇÕES BRASIL PARA CONTRIBUIR PARA GESTÃO DE RESÍDUO.....	26
4.6 PROPOSTA DE MODELO OPERACIONAL: DA LOGÍSTICA REVERSA À RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.6.1 Matriz de Responsabilidades e Responsabilidade Estendida do Produtor (REP)	ERRO! Indicador não definido.
4.6.2 Exemplo de Fechamento de Ciclo	ERRO! Indicador não definido.
5 CONCLUSÕES.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
REFERÊNCIAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A busca por um futuro sustentável tornou-se um marco global nas últimas décadas. O reconhecimento dos limites dos recursos naturais e dos impactos ambientais provocados pelo desenvolvimento desenfreado tem intensificado a conscientização sobre a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis em todos os setores da sociedade (A ONU e o meio ambiente, 2020).

Nesse cenário, a crise energética, decorrente da exploração intensiva dos recursos naturais, configura-se como um dos principais desafios contemporâneos (Iea, 2022; Epe, 2022). A transição para fontes renováveis de energia, especialmente a solar, apresenta-se como uma alternativa estratégica para mitigar esses impactos, conciliando o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental (Aneel, 2023). Pinheiro, Carvalho e Machado (2023) destacam que o fortalecimento dessas políticas é decisivo para ampliar o acesso à tecnologia e consolidar o papel do país na transição energética sustentável.

Conforme destacado por Boff (2017), alcançar um equilíbrio genuíno e abrangente requer a implementação efetiva da sustentabilidade, acompanhada dos princípios de cuidado e prevenção.

Diante disso, é notável que a ideia de sustentabilidade não se limita apenas a uma preocupação ambiental. Ela engloba também aspectos econômicos e sociais. De acordo com Sachs (2015), a busca por um equilíbrio genuíno e abrangente exige a consideração não apenas a conservação dos recursos naturais, mas também a promoção da equidade social e o crescimento econômico responsável.

Segundo Lindfeldt e Westermark (2009), a energia fóssil tem sido historicamente a fonte primária de energia para a humanidade e continua desempenhando um papel central até hoje. Atualmente, essa categoria de energia não renovável engloba recursos como petróleo, carvão mineral e gás natural.

A sociedade contemporânea enfrenta desafios relevantes no setor energético, marcados pela crescente demanda, pela volatilidade dos preços do petróleo e pelos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis, que intensificam o aquecimento global (Escobar et al., 2009).

Nesse contexto, a transição para uma matriz energética mais sustentável é fundamental. De acordo com o IPCC (2022), a queima contínua de combustíveis fósseis permanece como a

principal fonte de emissões globais de gases de efeito estufa e constitui um dos maiores obstáculos para limitar o aumento da temperatura média do planeta. O estudo aponta que apenas uma mudança estrutural na matriz energética — com a expansão das fontes renováveis e a redução progressiva do uso de petróleo, carvão e gás natural — permitirá atingir metas climáticas e garantir um desenvolvimento mais seguro e sustentável.

Ainda em segundo o IPCC (2022), reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e ampliar o uso de energias limpas é essencial para mitigar riscos ambientais, fortalecer a estabilidade energética e promover um futuro mais equilibrado para as próximas gerações.

Diante dessa interligação entre a crise energética e a busca por sustentabilidade, a inserção de novas tecnologias desempenha um papel crucial na mitigação desses desafios. De acordo com Jeremy Rifkin em seu livro "A Terceira Revolução Industrial" (Rifkin, 2021), a tecnologia não apenas proporciona soluções inovadoras para a geração e armazenamento de energia, mas também impulsiona a eficiência energética em diversas áreas. Essas tecnologias disruptivas, como a Internet das Coisas, e a inteligência artificial, estão redefinindo a forma como a sociedade interage com a energia, criando uma oportunidade para abordar a crise energética enquanto se avança em direção a um futuro mais sustentável.

Nesse contexto de avanços tecnológicos, os sistemas fotovoltaicos se destacam como uma solução promissora para a produção de energia limpa e sustentável. A capacidade de converter a luz solar em eletricidade de forma eficiente e ambientalmente responsável oferece uma alternativa viável às fontes de energia tradicionais.

Franco (2013) diz que os sistemas fotovoltaicos podem ser categorizados principalmente em duas configurações: isolados ou autônomos e conectados à rede elétrica. A diferença entre eles é na presença ou ausência de um sistema de armazenamento de energia (bateria), onde os sistemas autônomos possuem bateria.

Conforme observado por Woyte et al. (2003), nos países industrializados, os sistemas fotovoltaicos interligados à rede são frequentemente instalados de forma integrada às edificações. Essa integração desses sistemas com o ambiente construído apresenta um considerável potencial para a redução de custos, tanto para as concessionárias quanto para a construção em si.

Diante do cenário exposto, a seguir são apresentados os objetivos do presente trabalho.

1.2 Objetivos de pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, abrangendo desde a extração das matérias-primas até o seu descarte, com uma avaliação abrangente dos impactos ambientais associados a cada etapa.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar o desempenho ambiental de sistemas fotovoltaicos;
- b) Comparar diferentes tecnologias fotovoltaicas;
- c) Identificar oportunidades de melhoria;
- d) Analisar o ciclo de vida completo dos sistemas fotovoltaicos, considerando todas as fases do processo.

1.3 Justificativa

A transição para uma matriz energética sustentável é crucial diante dos desafios da crise energética e das questões ambientais. Este estudo se justifica ao investigar o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos, avaliando seus impactos ambientais, visando contribuir para uma abordagem mais embasada e sustentável na produção de energia. A pesquisa está alinhada com as abordagens propostas por autores como Rifkin (2021), que enfatizam o papel das tecnologias disruptivas na busca por soluções energéticas mais sustentáveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A ACV oferece uma visão holística dos impactos ambientais de produtos, processos ou serviços, considerando todos os fluxos de matéria e energia associados desde a extração da matéria-prima até a disposição final, abordagem conhecida como “do berço ao túmulo” (IBICT, 2024; REDE ACV, 2020).

Ainda Ibict (2024) e Rede Acv (2020), um estudo de ACV segue as diretrizes definidas pelas normas ISO 14040 (princípios e estrutura) e ISO 14044 (requisitos e orientações), que

definem quatro grandes etapas: definição de objetivo e escopo; inventário de ciclo de vida; avaliação de impactos; e interpretação dos resultados.

A ampla adoção da ACV decorre da sua capacidade de identificar os chamados “hotspots ambientais”, ou seja, as etapas do ciclo de vida responsáveis pela maior parte dos impactos ambientais. Esse diagnóstico permite que empresas e gestores desenvolvam estratégias mais eficientes de redução de emissões, consumo de recursos e geração de resíduos (Recima21, 2023). Além disso, estudos recentes mostram que a aplicação da ACV tem se expandido no Brasil em setores como construção civil, energia, embalagens e materiais poliméricos, reforçando seu papel como ferramenta de apoio à decisão (Santos; Monte; Silva, 2023).

Nos últimos anos, a metodologia evoluiu para incorporar novos desafios contemporâneos: a crescente complexidade de cadeias produtivas, a demanda por transparência ambiental, a necessidade de incorporar práticas de economia circular, e a urgência de compatibilizar a ACV com políticas públicas e metas de sustentabilidade (Willers; Rodrigues; Silva, 2013).

Além disso, o uso da ACV tem se expandido para novos setores, por exemplo, na construção civil, materiais de construção, sistemas de impermeabilização mostrando sua adaptabilidade e relevância para planejamento ambiental e de projetos sustentáveis. (Santos; Monte; Silva, 2023).

Por fim, a literatura contemporânea enfatiza a necessidade de constante atualização dos bancos de dados de inventário, dos métodos de avaliação de impacto e da definição das fronteiras dos sistemas analisados. Esse aprimoramento contínuo é essencial para representar adequadamente as realidades locais, especialmente em países em desenvolvimento, onde fatores climáticos, tecnológicos e socioeconômicos diferem significativamente das condições em que muitos bancos de dados internacionais foram desenvolvidos (BORGES et al., 2024; Willers; Rodrigues; Silva, 2013).

Assim, a ACV permanece uma ferramenta essencial para avaliações ambientais robustas, para suporte à decisão nas empresas e para fundamentação de políticas públicas e estratégias de sustentabilidade, servindo como base para a transição a modelos mais circulares e conscientes de produção e consumo.

2.1.1 Contexto histórico

Para entender o surgimento da Análise de Ciclo de Vida (ACV), é importante considerar seu contexto histórico. Os estudos pioneiros relacionados a ACV tiveram sua origem de maneira discreta durante a primeira crise do petróleo, um período em que o mundo começou a perceber a necessidade de uma gestão mais eficiente dos recursos naturais. Nesse cenário, surgiram investigações conhecidas como *Resource Environmental Profile Analysis* (REPA) com o objetivo de avaliar os processos de produção e otimizar o uso de energia (Revista Ibero-Americana de Estratégia, 2008).

Conforme ressaltado por Chehebe (1997), a Análise de Ciclo de Vida (ACV) requer uma análise abrangente dos produtos envolvidos no sistema, abrangendo todas as categorias de impactos ambientais. Essa metodologia, inicialmente conhecida como REPA, surgiu em resposta à primeira crise do petróleo, quando o mundo reconheceu a importância de aperfeiçoar o uso dos recursos naturais. A ACV, consequentemente, evoluiu para se tornar um instrumento fundamental na gestão dos aspectos ambientais ao longo das diversas fases dos sistemas de produção.

2.1.2 Evolução da ACV e sua Ampla Utilização

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) ainda é uma disciplina relativamente recente, com seu desenvolvimento principalmente a partir de meados da década de 1980, como destacado por Finnveden et al. (2009). Em relação à sua evolução e maturidade, Klöpffer (2006) afirma que a ACV se estabeleceu como uma metodologia amplamente utilizada devido à sua abordagem integrada para lidar com aspectos como estrutura, avaliação de impacto e qualidade dos dados, consolidando assim sua relevância no contexto da gestão ambiental e da sustentabilidade.

Nos anos 2000, a consolidação das normas ISO 14040 e ISO 14044 contribuíram para padronizar terminologias, etapas e requisitos de transparência, permitindo maior comparabilidade entre estudos (ISO, 2006). Paralelamente, avanços metodológicos ampliaram sua robustez, como a distinção entre ACV atribucional e consequencial, a expansão de bases de dados internacionais e o aprimoramento de métodos de avaliação de impacto, como o ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017).

Estudos recentes reforçam que a ACV continua em evolução, com novas abordagens para tratar incertezas, temporalidade, modelagem espacial e integração com a Avaliação de

Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA) (Mello, 2022; Carpenter et al., 2024). Esses avanços demonstram que, embora madura, a ACV permanece dinâmica, respondendo às demandas crescentes por métricas mais precisas e alinhadas ao contexto da sustentabilidade contemporânea.

2.1.3 ACV no Brasil

No cenário brasileiro, a aplicação da ACV para produtos ainda não atingiu uma ampla disseminação, com apenas algumas empresas e instituições a incorporando em suas práticas, incluindo a Mercedes-Benz do Brasil e o Instituto Técnico de Alimentação (Chehebe, 1997).

No entanto, conforme Lemos e Barros (2006) destacaram, no Brasil e na maioria dos países da América Latina, essas iniciativas ainda não atingiram o nível desejado, quando comparadas com as principais potências econômicas, tais como a União Europeia, o Acordo de Livre Comércio da América do Norte (Nafta) e a Cooperação Econômica da Ásia e do Pacífico (APEC).

No âmbito empresarial, a ACV vem sendo aplicada com maior intensidade em segmentos como automotivo, embalagens, alimentos e energia, com iniciativas de empresas como Natura, Braskem e Duratex. Essas corporações têm divulgado inventários e estudos comparativos para apoiar decisões de sustentabilidade e comunicação ambiental (Akatu, 2012; Braskem, 2023). Apesar dos avanços, a literatura aponta que a ACV ainda não está amplamente difundida entre pequenas e médias empresas (PMEs), principalmente devido ao custo de implementação, à necessidade de formação de competências específicas e à baixa maturidade do tema na sociedade brasileira (Fgv Eaesp, sd; Sebrae, 2023).

Além disso, pesquisadores ressaltam a falta de bases de dados nacionais consolidadas, levando muitos estudos a utilizarem bancos internacionais, como Ecoinvent e USLCI, o que reduz a representatividade dos resultados em contextos tropicais e regionais. Nesse cenário, iniciativas como o SICV Brasil, coordenado pelo Ibict, e os esforços da Rede Brasileira de ACV têm contribuído para a estruturação de inventários nacionais e para a disseminação metodológica no país (Ibict, 2024; Rede Acv, 2020).

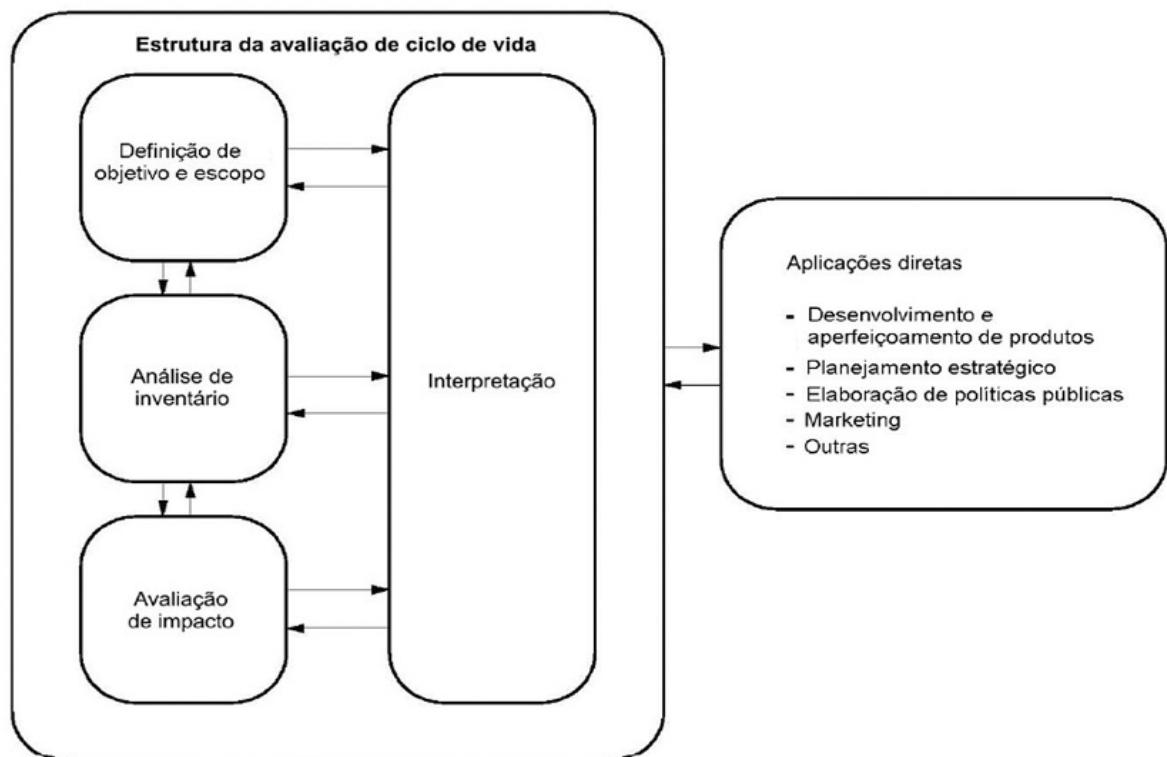
Embora o Brasil apresente progressos, a literatura contemporânea indica que a ACV ainda não atingiu o nível desejado de institucionalização, especialmente quando comparada a blocos econômicos desenvolvidos (Coelho Filho; Lui, 2016). Entretanto, observa-se uma tendência positiva: a crescente integração da ACV em agendas de economia circular,

certificações ambientais e políticas de descarbonização apontam para o aumento da maturidade e da relevância desse instrumento nos próximos anos.

2.1.4 Conceitos chave

Conforme estipulado pela ISO 14040:2009, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) realiza uma avaliação sistemática dos aspectos e impactos ambientais de sistemas de produtos, abrangendo desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final, tudo de acordo com os objetivos e o escopo estabelecido. A flexibilidade inerente à ACV é refletida na sua adaptação ao conceito de unidade funcional, um elemento distintivo da metodologia. Além disso, a metodologia da ACV está aberta à incorporação de novos avanços científicos e melhorias no estado-da-arte da técnica, garantindo a sua atualização contínua.

Figura 1– Estrutura da avaliação de ciclo de vida



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009a).

A metodologia da ACV, conforme descrito por Luz (2011) e padronizado pela série de normas ISO 14040, é composta por quatro fases interligadas, conforme apresentado na Figura 1: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

A fase inicial, de Definição de Objetivo e Escopo, é o momento em que se determina a finalidade e a abrangência do estudo de ACV, definindo o propósito da avaliação, o produto ou processo a ser analisado e os limites do sistema.

Em seguida, a fase de Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é dedicada à coleta e ao procedimento de cálculo para a quantificação de todos os fluxos de massa e energia. É nesta fase que são quantificadas as entradas e saídas que irão construir a base de dados para a avaliação de impacto. A norma ISO 14044:2009 detalha a sequência dos procedimentos para a análise do inventário, incluindo a preparação para a coleta, a validação e a agregação dos dados. As principais Entradas a serem quantificadas no sistema são os recursos consumidos, como matérias-primas extraídas da natureza, energia (eletricidade, combustíveis) e água. As principais Saídas compreendem o produto final útil gerado e todas as emissões liberadas para o ambiente, como gases atmosféricos (emissões), resíduos sólidos e efluentes hídricos.

A terceira fase é a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). Esta etapa utiliza os resultados quantificados do inventário para avaliar a significância dos impactos ambientais potenciais. Conforme Luz (2011), a escolha dos impactos avaliados e das metodologias utilizadas, bem como o nível de detalhe, é diretamente relacionado ao objetivo e ao escopo definidos no início do estudo.

Por fim, a Interpretação é a etapa conclusiva da ACV. Seu objetivo é extrair conclusões e recomendações a partir dos dados. São identificados os pontos críticos do ciclo de vida, sendo obtidos diversos indicadores quanto aos impactos gerados pelas entradas e saídas do sistema analisado, oferecendo suporte à tomada de decisão.

2.1.5 A Energia Solar

A humanidade tem uma ligação ancestral com a energia solar, datando de muitos séculos atrás, quando o sol era utilizado para secar peles e alimentos. Achados arqueológicos comprovam que, já no século VII a.C., eram usadas lentes simples de vidro para concentrar a luz solar, possibilitando a queima de pequenos pedaços de madeira para gerar fogo (Farias, 2011).

De acordo com Cunha (2016), com a crescente disponibilidade e ampliação das opções de fontes de energia não renovável, houve uma diminuição progressiva no uso da energia solar. No entanto, atualmente, o aumento gradual no custo do petróleo e a crescente conscientização ambiental sobre o uso de fontes renováveis de energia estão impulsionando

um notável crescimento na indústria solar. Isso direciona a ênfase da economia para fontes alternativas, destacando, assim, o papel crucial da energia solar como uma fonte renovável de energia.

Nas últimas duas décadas, a energia solar consolidou-se como uma das principais alternativas renováveis globalmente, devido à queda expressiva nos custos dos módulos fotovoltaicos, ao avanço tecnológico e ao fortalecimento de políticas públicas voltadas à transição energética. No Brasil, esse movimento foi potencializado com a criação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, que regulamentou o sistema de compensação de energia elétrica e viabilizou a geração distribuída solar no país, promovendo uma expansão acelerada da adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais, comerciais e industriais (Aneel, 2022).

Estudos recentes destacam que a energia solar desempenha papel estratégico na redução de emissões de gases de efeito estufa, no fortalecimento da segurança energética e na descentralização da matriz elétrica brasileira, hoje uma das mais renováveis do mundo (Epe, 2023; Iea, 2024). A combinação entre abundância de radiação solar, custos competitivos e incentivos regulatórios posiciona o Brasil entre os países com maior potencial de crescimento no setor fotovoltaico na próxima década.

2.2 Geração Distribuída no Brasil

A Geração Distribuída (GD) desempenha um papel central na ascensão da energia solar no Brasil, consolidando-se como o segmento mais representativo do setor fotovoltaico nacional. Segundo dados recentes da ABSOLAR, dos 60,7 GW instalados em energia solar no país, 24,5 GW correspondem à geração distribuída, enquanto 36,2 GW estão ligados à geração centralizada (Absolar, 2025).

O domínio da fonte solar na GD é praticamente absoluto: 99,98% de todas as conexões de geração distribuída no Brasil utilizam sistemas fotovoltaicos (Absolar, 2025). Esse crescimento expressivo reflete a atratividade econômica, a flexibilidade tecnológica e a ampla adoção por consumidores residenciais, comerciais e industriais.

Até 2025, o Brasil registrou 3.830.902 sistemas fotovoltaicos conectados à rede, demonstrando a consolidação da fonte solar como uma alternativa acessível e estratégica para redução de custos e autonomia energética por parte dos consumidores (Absolar, 2025).

A distribuição da GD por classe de consumo reforça sua capilaridade: o setor residencial responde por 79,8% das conexões, seguido pelo setor comercial (9,89%), rural (7,09%), industrial (2,86%) e poder público (0,34%) (Absolar, 2025).

Além disso, o país tem registrado recordes de produção. Em agosto de 2025, por exemplo, o Sistema Interligado Nacional (SIN) alcançou novos picos de geração solar, evidenciando a crescente contribuição dessa fonte para a matriz elétrica nacional (Absolar, 2025).

A GD solar representa, portanto, não apenas um vetor de expansão da capacidade elétrica instalada, mas também uma ferramenta de democratização do acesso à energia renovável, permitindo que consumidores se tornem protagonistas no processo de transição energética do país.

2.2.1 A Energia Solar no Brasil

Bandeira (2012) destaca a diversificada matriz energética do Brasil, que abrange notáveis reservas de fontes não renováveis, como petróleo, gás natural, carvão e urânio, além de diversas fontes de energia renovável. O país se destaca especialmente pelo amplo potencial em hidrelétrica, eólica, solar e biomassa para a geração de energia elétrica.

Segundo Fagundes (2012), a região no Brasil com a menor incidência de radiação solar global está situada no estado de Santa Catarina, registrando 4,25 kWh/m². Esse valor é aproximadamente quatro vezes superior ao observado no território da Alemanha, que se destaca como líder mundial na utilização de energia solar.

Como aponta Lopes (2011), as energias renováveis, incluindo a energia solar, têm sido a base energética há gerações. Portanto, os benefícios ambientais e de saúde pública, a segurança e o desenvolvimento energéticos e os benefícios econômicos proporcionados por estas fontes são proeminentes.

Embora o Brasil possua um enorme potencial para o aproveitamento da energia solar, o avanço dessa fonte ainda ocorre de forma lenta e desigual. Parte dessa limitação está associada a barreiras econômicas, técnicas e institucionais que dificultam a expansão do setor. Para que o desenvolvimento ocorra de maneira consistente, é fundamental contar com políticas públicas estáveis e com linhas de financiamento que incentivem a produção nacional de equipamentos. Conforme destaca o BNDES (2023), o fortalecimento da geração solar fotovoltaica depende diretamente desses incentivos, pois eles reduzem a dependência de importações e impulsionam a estruturação da cadeia produtiva local.

Além disso, estudos recentes indicam que a consolidação desse mercado está fortemente relacionada à disponibilidade de investimentos e subsídios públicos, essenciais para diminuir os custos iniciais e ampliar o acesso à tecnologia, sobretudo no segmento residencial (Oliveira; Wanderley, 2023; Marcuzzo et al., 2025).

2.2.2 A Energia Fotovoltaica

Segundo Morais (2015), há um interesse crescente em pesquisas voltadas à produção de energia que buscam otimizar o uso dos recursos ambientais existentes. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma alternativa promissora, pois utiliza materiais semicondutores para converter a radiação solar em energia elétrico, por meio do chamado efeito fotovoltaico. Esse fenômeno foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmund Becquerel, que constatou que, ao expor uma solução condutora à luz solar, surgia uma diferença de potencial entre seus eletrodos (Cunha, 2016).

Segundo Cresesb (2006), as células fotovoltaicas são produzidas principalmente a partir de silício (Si) e podem ser compostos por silício monocristalino, silício policristalino, ou silício amorfo.

Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ela gera uma corrente elétrica. Essa corrente é conduzida através de fios conectados à bateria e transmitida aos demais componentes do sistema. Portanto, ao interligar mais células fotovoltaicas em série ou em paralelo, observa-se um aumento na corrente e na tensão geradas (Pereira et al., 2006).

Nesse contexto, torna-se essencial analisar o desempenho ambiental dos sistemas fotovoltaicos ao longo de todo o seu ciclo de vida, comparando tecnologias, identificando pontos críticos e apontando oportunidades de melhoria. Assim, o estudo busca oferecer uma visão clara e objetiva sobre os impactos e potencial de aprimoramento desses sistemas.

2.2.3 Comparação entre Tecnologias Fotovoltaicas sob a Perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida

As tecnologias fotovoltaicas diferenciam-se quanto aos materiais utilizados, eficiência energética e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. As mais difundidas comercialmente são baseadas em silício cristalino, especialmente os módulos monocristalinos e policristalinos, enquanto tecnologias de filmes finos, como CdTe e CIGS, apresentam menor participação de mercado, porém características ambientais distintas (Iea, 2023; Fraunhofer Ise, 2023).

Os módulos monocristalinos apresentam maiores eficiências, possibilitando maior geração por área instalada, porém demandam processos produtivos mais intensivos em energia, concentrando maiores impactos ambientais na fase de manufatura. Já os módulos policristalinos apresentam menor eficiência, mas requerem menor consumo energético em sua produção, o que pode resultar em desempenho ambiental semelhante em determinadas categorias de impacto, como emissões de gases de efeito estufa (Fthenakis; Kim, 2011; Yang et al, 2019).

As tecnologias de filmes finos destacam-se pelo menor consumo de material semicondutor e por processos produtivos menos intensivos em energia, apresentando, em geral, menores impactos ambientais na fase de fabricação. Entretanto, limitações relacionadas à eficiência, à disponibilidade de materiais críticos e à presença de elementos potencialmente tóxicos restringem sua aplicação em larga escala (Xu et al., 2018; Iea, 2023).

Sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida, observa-se que, independentemente da tecnologia, os maiores impactos ambientais concentram-se nas etapas de extração de matérias-primas e manufatura, enquanto a fase de operação apresenta impactos reduzidos. Ao longo da vida útil dos sistemas, estimada entre 25 e 30 anos, a energia gerada supera amplamente a energia consumida em sua produção, resultando em tempos de retorno energético favoráveis para todas as tecnologias analisadas (Xu et al., 2018; Irena, 2020).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da pesquisa

Quanto aos procedimentos metodológicos, o presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza teórica, com abordagem qualitativa, complementada por dados quantitativos, conforme a classificação proposta por Gil (2017). O trabalho fundamenta-se, predominantemente, em pesquisa bibliográfica e documental, a partir da análise de livros, artigos científicos, normas técnicas, relatórios institucionais e documentos oficiais relacionados à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e à energia solar fotovoltaica.

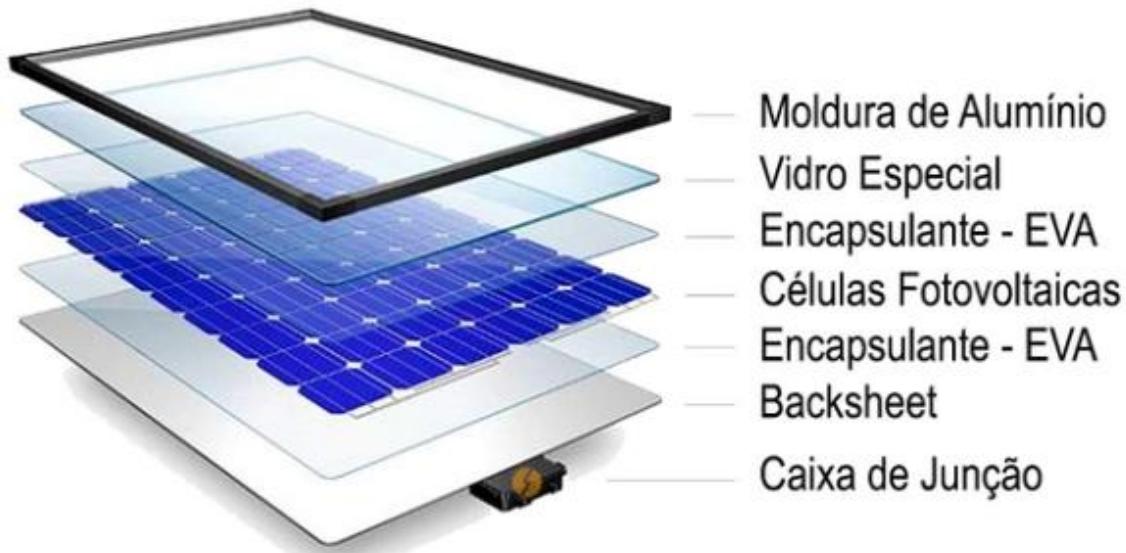
A coleta de dados foi realizada por meio de fontes secundárias, contemplando publicações nacionais e internacionais, bases técnicas e documentos normativos, com destaque para as diretrizes da série ISO 14040/14044, relatórios setoriais e estudos científicos recentes. Não foi conduzida pesquisa de campo direta, sendo adotada uma abordagem analítica e conceitual compatível com os objetivos propostos.

Em relação à análise dos dados, adotou-se uma abordagem qualitativa-descritiva, com apoio de informações quantitativas extraídas da literatura, visando compreender e interpretar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. Essa estratégia possibilitou a avaliação integrada das diferentes etapas do ciclo de vida, bem como a identificação de aspectos críticos e oportunidades de melhoria, alinhando-se aos princípios metodológicos da ACV.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico apresenta os resultados referentes à identificação das principais matérias-primas empregadas na fabricação de painéis fotovoltaicos. Os dados obtidos indicam que os principais insumos envolvidos nesse processo são a moldura de alumínio, as células fotovoltaicas, o vidro fotovoltaico, o filme encapsulante (EVA), o backsheets e a caixa de junção, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2– Componentes de um painel fotovoltaicos.



Fonte: Portal Solar (2023).

A Figura 2 ilustra de forma esquemática a estrutura em camadas de um módulo fotovoltaico, evidenciando os principais componentes que o constituem, como a moldura de alumínio, o vidro especial, as camadas de encapsulante (EVA), as células fotovoltaicas, o backsheets e a caixa de junção. Essa representação visual complementa as informações

apresentadas na Tabela 1, que descreve a função de cada componente e sua respectiva participação no custo total de fabricação do módulo.

Tabela 1– Composição estrutural de módulos fotovoltaicos e distribuição percentual de custos.

Componente	Descrição	Participação no custo (%)
Vidro especial (baixo teor de ferro)	Vidro temperado e antirreflexivo, desenvolvido para minimizar a reflexão da radiação solar e proteger as células fotovoltaicas, permitindo maior aproveitamento da luz incidente.	10%
Célula fotovoltaica (silício)	Elemento principal do painel, responsável pela conversão da radiação solar em energia elétrica, composta majoritariamente por silício cristalino de alta pureza.	60%
Filme encapsulante (EVA)	Material selante que protege as células contra radiação UV, variações térmicas e umidade, garantindo a durabilidade do módulo e a eficiência óptica.	8%
Backsheet	Filme aplicado na parte traseira do módulo, responsável pela proteção mecânica e isolamento elétrico das células fotovoltaicas.	8%
Caixa de junção	Componente localizado na parte traseira do painel, responsável pela interconexão elétrica das células, contendo diodos de by-pass, cabos e conectores.	6%
Moldura de alumínio	Estrutura metálica que reforça o módulo, garantindo rigidez, proteção mecânica e resistência a condições ambientais adversas.	8%

Fonte: Portal Solar (2023).

Segundo Villalva (2015), os módulos fotovoltaicos podem ser produzidos com diferentes materiais, entretanto, o silício se destaca, fazendo parte de 95% dos painéis confeccionados no mundo. De acordo com a PV Cycle (2016), um painel fotovoltaico comum feito de silício é formado, em média, por 78% de vidro, 10% de alumínio, 7% de materiais plásticos e os outros 5% correspondem a metais e semicondutores, como mostra a Figura 3.

Figura 3– Representação da média de materiais que compõem um módulo fotovoltaico.



Fonte: PV Cycle (2016).

A Figura 3 evidencia a predominância do vidro na composição de módulos fotovoltaicos à base de silício, representando cerca de 78% da massa total do painel. Esse elevado percentual está associado à necessidade de proteção mecânica, transparência óptica e durabilidade do módulo ao longo de sua vida útil.

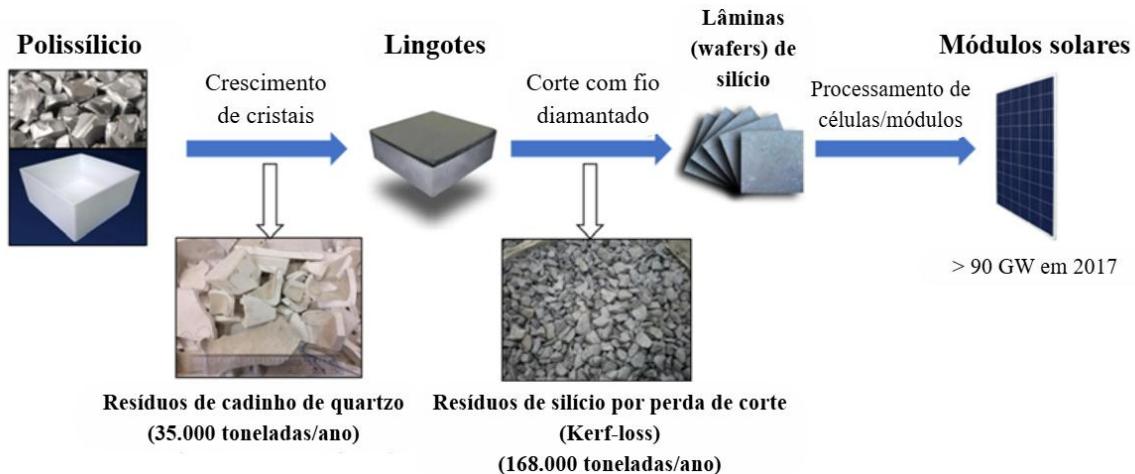
O alumínio corresponde aproximadamente a 10% da composição do módulo e é empregado principalmente na moldura estrutural, desempenhando papel fundamental na rigidez, resistência mecânica e estabilidade do painel durante sua operação.

Os materiais plásticos, que somam cerca de 7%, incluem componentes como o filme encapsulante (EVA) e o backsheet. Esses elementos são responsáveis pela proteção das células fotovoltaicas contra umidade, radiação ultravioleta e variações térmicas, contribuindo para a confiabilidade do sistema.

Por fim, os metais e semicondutores representam cerca de 5% da massa total do módulo. Apesar da menor participação em massa, esses materiais possuem elevado valor tecnológico e ambiental, pois incluem o silício de grau solar e metais utilizados nas conexões elétricas, sendo críticos para o desempenho do painel e relevantes nas análises de impacto ambiental e estratégias de reciclagem.

Yang et al. (2019) descrevem os principais processos envolvidos na transformação do silício em células fotovoltaicas, bem como os resíduos gerados ao longo dessas etapas produtivas, conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 4– Cadeia de Valor de fabricação na indústria fotovoltaica, principais resíduos identificados (quartzo quebrado e Silício perdido no corte).



Fonte: Yang et al. (2019)

O esquema apresentado na figura 4, demonstra a cadeia de valor de fabricação na indústria fotovoltaica. Entre os principais resíduos identificados destacam-se os quartzo quebrados e o silício perdido durante o processo de corte, os quais representam perdas significativas de material e demandam estratégias adequadas de reaproveitamento ou reciclagem.

Xu et al. (2018) apresentam representações detalhadas do ciclo de vida do silício aplicado à produção de painéis fotovoltaicos.

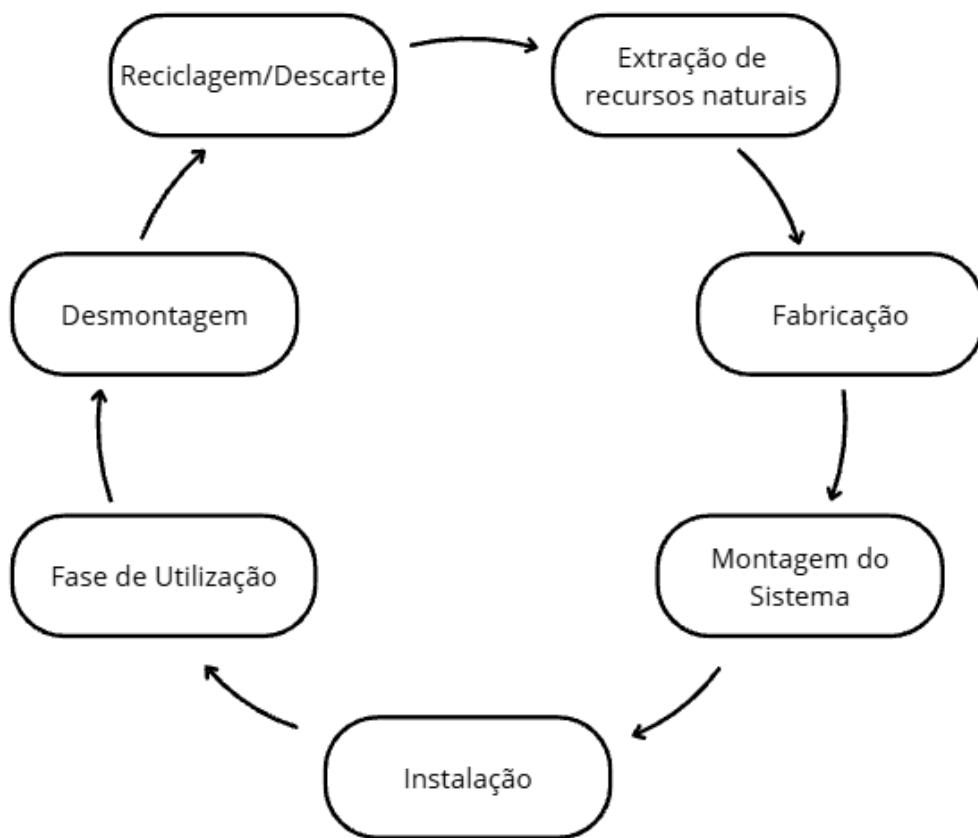
Figura 5–ciclo de vida do silício para painel fotovoltaico.



Fonte: Xu et al. (2018).

A Figura 5 apresenta o ciclo de vida do silício empregado na fabricação de painéis fotovoltaicos, desde a extração do quartzo até a etapa de reciclagem ao final da vida útil. O processo envolve a purificação do silício, sua transformação em lingotes, lâminas (*wafers*) e células fotovoltaicas, que posteriormente são integradas aos módulos e sistemas fotovoltaicos, passando pelas fases de transporte, uso e geração de eletricidade. Considerando a limitação de informações recentes sobre determinados processos produtivos, este estudo incorpora a etapa de reciclagem no ciclo de vida analisado, permitindo uma avaliação mais completa do sistema.

Figura 6– Ciclo de vida de um painel fotovoltaico.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como mostra a figura 6, após a extração dos recursos naturais e os mesmos sendo direcionados para a fabricação, o processo de montagem de um painel fotovoltaico inicia-se com a preparação e limpeza do vidro especial, etapa essencial para garantir a adequada adesão do material encapsulante e a durabilidade do módulo. Em seguida, as células fotovoltaicas de silício são interconectadas por meio de fitas condutoras metálicas, formando séries elétricas

que são posteriormente organizadas e posicionadas sobre o vidro e a primeira camada de encapsulante (EVA), em um processo conhecido como *layup*. Após o alinhamento das séries, realiza-se a interligação elétrica entre elas e o empilhamento das camadas finais, incluindo a segunda folha de EVA e o backsheet. O conjunto é então submetido à lamação, etapa em que as camadas são fundidas sob condições controladas de temperatura e pressão, tornando o módulo impermeável e mecanicamente estável. Após a lamação, são executados o corte das rebarbas, a instalação da caixa de junção e a fixação da moldura de alumínio, que confere rigidez estrutural ao painel. Por fim, o módulo passa por testes de inspeção e desempenho elétrico, como ensaios de eletroluminescência e medição de potência, sendo posteriormente classificado, embalado e preparado para distribuição (Portal Solar, 2019).

A fase de instalação do sistema fotovoltaico compreende as atividades necessárias para a integração dos módulos ao local de uso, conforme o projeto previamente definido. Essa etapa envolve a fixação de suportes e trilhos estruturais, geralmente de alumínio, sobre a edificação, seguidas pelo posicionamento dos painéis e pela realização das conexões elétricas. Por fim, os módulos são conectados ao inversor e integrados à rede elétrica da unidade consumidora, possibilitando o início da geração de energia e encerrando a fase de instalação no ciclo de vida do sistema (Portal Solar, 2019).

Após a utilização dos painéis, as duas últimas etapas do ciclo de vida do painel fotovoltaico se dá recuperação e ao reaproveitamento dos materiais ao final da vida útil do sistema. O processo inicia-se com a coleta dos módulos descartados, seguida pela desmontagem, na qual componentes como moldura metálica, vidro e elementos semicondutores são separados. Na sequência, os materiais passam por tratamentos específicos, conforme suas características físicas e químicas, viabilizando sua transformação e reinserção como matéria-prima em novas cadeias produtivas. Os materiais que não apresentam viabilidade técnica ou econômica de reaproveitamento são destinados a aterros sanitários ou processos de incineração, encerrando o ciclo de vida do sistema e permitindo a avaliação completa dos impactos associados ao fim de vida (Portal Solar, 2019).

4.1 Impactos ambientais

A energia solar é mundialmente conhecida como uma fonte de energia renovável, pois ela não se esgota com o uso, pode ser amplamente explorada sem causar danos irreversíveis ao meio ambiente. Entretanto, embora seja considerada uma forma de geração de energia de

baixo impacto ambiental, vale ressaltar que toda atividade humana de produção energética gera algum tipo de impacto, e a geração fotovoltaica está inclusa.

Como impacto ambiental pode ser compreendido como qualquer modificação nas características de um sistema ambiental, seja de natureza física, química, biológica, social ou econômica, provocada por ações humanas que afetem de forma direta ou indireta o ambiente (Rima, 2020).

Segundo Werner (2021), os impactos ambientais decorrentes de instalações de geração solar fotovoltaica estão diretamente relacionadas à sua localização, às condições físico-climáticas da área de instalação e às particularidades dos ecossistemas.

A Tabela a seguir reúne os principais impactos ambientais decorrentes da implantação de usinas solares fotovoltaicas. Esses impactos foram organizados conforme o meio afetado (físico, biótico e socioeconômico) e descritos de forma a facilitar a compreensão de suas causas e efeitos.

Tabela 2 – Principais impactos ambientais associados à implantação de usinas solares fotovoltaicas.

Meio Impactado	Tipo de Impacto	Descrição / Observações
Físico	Alteração ou degradação da paisagem	A instalação dos módulos e demais estruturas pode modificar a paisagem natural, especialmente em áreas rurais ou de relevância visual, exigindo medidas de compensação paisagística.
	Geração de resíduos sólidos e risco de contaminação do solo	Durante as obras, há geração de resíduos (metálicos, plásticos e químicos) e risco de contaminação do solo por derramamento de óleos, graxas e outros insumos.
	Emissão de poeira e gases	A movimentação de solo, transporte de materiais e operação de máquinas liberam poeira e gases (CO_2 , NO_x), impactando a qualidade do ar e a vegetação próxima.
	Erosão e alterações no escoamento hídrico	A retirada de vegetação e o nivelamento do terreno podem provocar erosão, assoreamento de corpos hídricos e alteração no fluxo natural de drenagem.
	Alterações morfológicas e instabilidade superficial	As intervenções geotécnicas para fundações e acessos podem gerar instabilidade e movimentação de sedimentos, afetando a estrutura do solo.
Biótico	Supressão da cobertura vegetal	A limpeza e preparo do terreno resultam na perda de vegetação nativa e fragmentação de habitats, afetando a flora e a fauna locais.
	Alteração da dinâmica dos ecossistemas	O desmatamento e a compactação do solo modificam as relações ecológicas, afetando espécies e promovendo migração ou extinção local.
	Afugentamento da fauna	Ruídos, vibrações e circulação de maquinário durante a construção provocam o afastamento de animais silvestres e da microfauna.
	Redução da biodiversidade	A perda de habitat e a fragmentação de áreas naturais diminuem a diversidade de espécies e o equilíbrio ecológico regional.
	Acidentes envolvendo fauna silvestre	A presença de vias de acesso e máquinas pode aumentar a ocorrência de atropelamentos e acidentes com animais nativos.
Socioeconômico	Geração de emprego e renda	A construção e operação das usinas geram empregos diretos e indiretos, impulsionando a economia local e regional.
	Aquecimento da economia local	O aumento da demanda por bens e serviços movimenta o comércio e eleva a arrecadação de tributos municipais.
	Aumento do tráfego e riscos viários	O fluxo de veículos e transporte de materiais pode elevar os índices de acidentes e causar incômodos à população local.
	Consumo de insumos e recursos locais	O uso intensivo de materiais de construção e serviços pode gerar escassez pontual de recursos, exigindo planejamento logístico.
	Risco de acidentes de trabalho	A execução das obras expõe trabalhadores a riscos físicos e operacionais, demandando medidas rigorosas de segurança.
	Avanço tecnológico e inovação	A adoção de tecnologias fotovoltaicas estimula a pesquisa, o desenvolvimento e a eficiência energética no setor elétrico.
	Uso de fonte de energia renovável e limpa	A substituição de combustíveis fósseis pela energia solar contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.
	Melhoria na segurança e estabilidade energética	A geração descentralizada diversifica a matriz elétrica e reduz a dependência de grandes hidrelétricas, embora apresente sazonalidade na produção.

Fonte: Filho et al.,2015.

Conforme apresentado na Tabela 1, os impactos ambientais associados à implantação de usinas solares fotovoltaicas manifestam-se de forma distinta sobre os meios físico, biótico e socioeconômico. Observa-se que os impactos negativos concentram-se principalmente nas fases de implantação e construção, envolvendo alterações na paisagem, geração de resíduos, supressão de vegetação e interferências na fauna e no solo. Por outro lado, os impactos positivos destacam-se, sobretudo no meio socioeconômico, com a geração de emprego e renda, estímulo à economia local, avanço tecnológico e contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essa análise evidencia que, embora existam efeitos adversos pontuais, os benefícios ambientais e socioeconômicos da energia solar fotovoltaica tendem a superar os impactos negativos, especialmente quando são adotadas medidas adequadas de planejamento, mitigação e gestão ambiental.

4.2 Analise dos Resultados

Para compreender integralmente os processos envolvidos na produção, instalação e funcionamento de longo prazo dos sistemas fotovoltaicos, é fundamental conhecer aspectos como a vida útil média e a taxa de degradação dos módulos. Segundo Pinto e Galdino (2014), um marco importante para a consolidação dessa tecnologia ocorreu em 1997, quando a *Siemens Solar Industries* ampliou a garantia dos módulos fotovoltaicos de 10 para 25 anos. Essa mudança impulsionou a padronização da indústria solar, levando os demais fabricantes a adotarem a garantia mínima de 25 anos como referência no setor.

No entanto, em 2016 dos mais de 300 GW de capacidade fotovoltaica instalada no mundo, aproximadamente 78% correspondiam a sistemas com menos de cinco anos de operação. Assim, sendo necessários mais de 20 anos para que dados de campo consistentes possam ser coletados, analisados e comparados, considerando a vida útil média de 25 anos dos módulos (Dnv, 2018).

A taxa de degradação dos módulos fotovoltaicos é um parâmetro essencial para avaliar o desempenho e a durabilidade dos sistemas ao longo do tempo. Ela indica a perda gradual de eficiência dos painéis, resultante da exposição contínua a fatores ambientais e de desgaste dos materiais que compõem o módulo.

Normalmente, é garantido de 10 a 12 anos uma potência de pico (Wp) mínima de 90% da potência nominal, e 80% por um período de 20 a 25 anos. A degradação da potência dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) instalados em campo situa-se entre 0,5% e 1% ao ano (IPCC, 2012), havendo fabricantes que já se comprometem com uma degradação

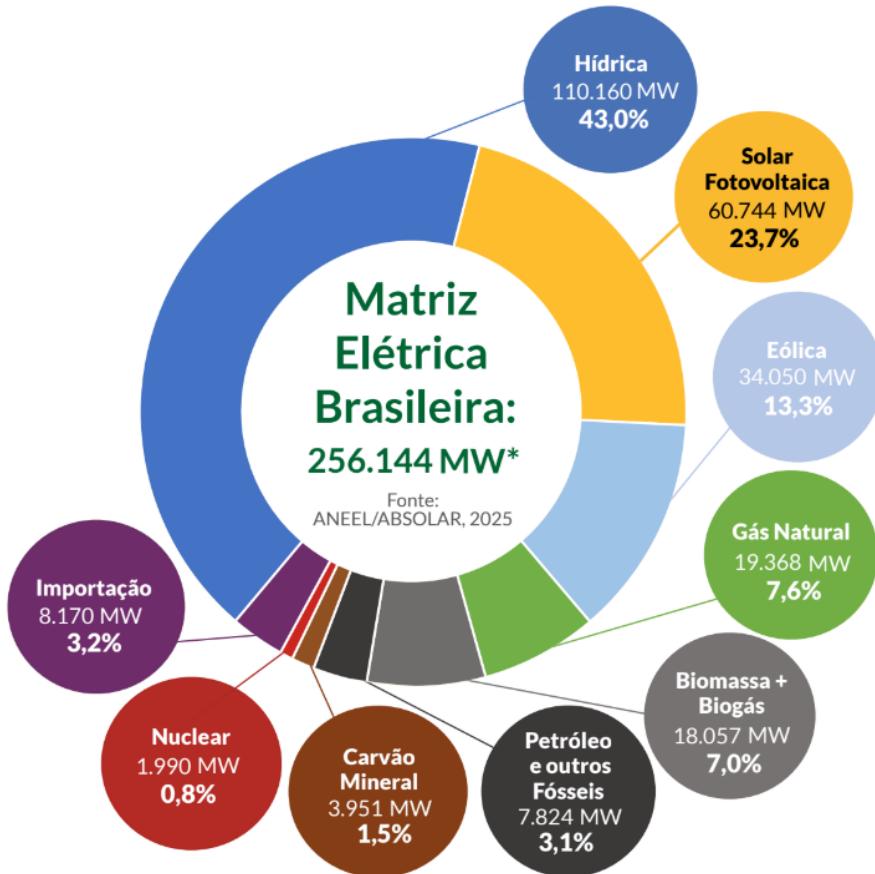
anual inferior a 0,5% (NREL, 2018), o que demonstra avanços significativos nos processos de fabricação. Estudos indicam ainda que as principais causas de degradação dos módulos estão associadas à delaminação 42%, corrosão 19%, quebras 19%, descoloração 12% e à ocorrência de fendas e fissuras 8% nos painéis fotovoltaicos (Dnv, 2018).

Além da análise de degradação e vida útil, diversos autores também investigam o tempo de payback energético dos sistemas fotovoltaicos, ou seja, o período necessário para que o painel produza a mesma quantidade de energia consumida em toda a sua cadeia de produção. Entre os estudos analisados, quatro deles apresentam esse tipo de avaliação. Xu et al. (2018) encontraram tempos de retorno energético variando entre 0,8 e 5,6 anos nos países investigados, demonstrando a eficiência dos sistemas atuais. Amarakoon et al. (2018) identificaram um payback de 1,91 anos; Bezerra, Antonio e Aparecida (2018), de 2,94 anos; e Constantino et al. (2018) reportaram resultados entre 2,91 e 5,16 anos. De modo geral, a maioria dos sistemas analisados retorna o investimento energético entre 0,8 e 5,6 anos, o que reforça a efetividade ambiental da tecnologia, conforme discutido também por Konzen (2020).

4.3 Matriz de comparação de energia fotovoltaica x hidrelétrica x termoelétrica.

O avanço da energia solar no Brasil segue o movimento mundial de redução das emissões no setor elétrico e evidencia a importância de diversificar a matriz energética nacional. Esse crescimento está diretamente ligado à necessidade de complementar a geração hidrelétrica, especialmente em um cenário marcado pela instabilidade do regime de chuvas e pela crescente demanda por fontes alternativas e sustentáveis.

Figura 7– Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Absolar (2025).

Atualmente, a energia fotovoltaica corresponde a 23,7% da capacidade total instalada no país, posicionando-se como a segunda maior fonte de geração elétrica. As hidrelétricas permanecem em primeiro lugar, representando aproximadamente 43,0% da matriz nacional.

Segundo a ABSOLAR (2025), desde o início da expansão da energia solar no Brasil, a tecnologia já evitou a emissão de mais de 89,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono, contribuindo de forma significativa para a redução dos impactos ambientais associados à geração de eletricidade.

Ainda de acordo com a ABSOLAR, além dos benefícios ambientais, a energia solar tem desempenhado um papel relevante no dinamismo econômico do país. Os investimentos acumulados no setor ultrapassam R\$ 272 bilhões, resultando na criação de mais de 1,8 milhão de empregos relacionados à transição energética. A arrecadação tributária gerada pela cadeia solar também é expressiva, somando aproximadamente R\$ 84,9 bilhões, valores que podem ser direcionados a áreas essenciais, como saúde, educação e segurança pública.

Embora os sistemas fotovoltaicos sejam amplamente reconhecidos como uma alternativa sustentável e de baixo impacto durante a fase de operação é fundamental compreender que seus efeitos ambientais não são igualmente distribuídos ao longo do ciclo de vida. A maior parte deles ocorre antes e depois da fase de geração elétrica, concentrando-se principalmente na extração de matérias-primas, na manufatura dos módulos e no tratamento ao final da vida útil.

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mostram que, embora os impactos associados à tecnologia fotovoltaica sejam substancialmente menores do que aqueles observados em fontes convencionais, como termelétricas a carvão ou óleo combustível, eles não podem ser considerados desprezíveis.

A etapa de extração e beneficiamento dos materiais é particularmente significativa. A produção de módulos fotovoltaicos depende de insumos que demandam processos industriais energeticamente intensivos, como o quartzo utilizado para obtenção de silício policristalino e monocristalino, o alumínio empregado nas molduras dos módulos, o vidro temperado de baixa refletância e polímeros como EVA e *backsheet*. Esses materiais exigem processos industriais complexos e, muitas vezes, grandes consumidores de energia elétrica.

O processo de purificação do silício, especialmente quando realizado pelo método Siemens, requer temperaturas superiores a 1.400 °C. Isso resulta em elevado consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa associadas à matriz elétrica utilizada e geração de resíduos industriais, como lamas provenientes do corte de wafers e perdas de material sólido.

Conforme apontado por Latunussa et al. (2016), a fase de manufatura pode representar entre 60% e 70% do impacto total em categorias como pegada de carbono e consumo energético acumulado (CED).

Ao final da vida útil, estimada entre 25 e 30 anos, surgem desafios importantes relacionados à destinação dos módulos fotovoltaicos. Esses equipamentos são compostos por materiais cuja separação é complexa, como vidro aderido a camadas poliméricas, prata e cobre, além de pequenas quantidades de substâncias potencialmente tóxicas, incluindo o chumbo presente em algumas soldas.

A reciclagem dos módulos, embora tecnicamente viável, ainda enfrenta limitações relevantes. Entre elas estão os altos custos de processamento, a estruturação gradual da cadeia produtiva e a ausência de regulamentação específica em muitos países. A União Europeia destaca-se como referência ao exigir, por meio da diretiva WEEE, a coleta e reciclagem obrigatórias desses equipamentos.

Pesquisas recentes, como as de Xu et al. (2018) e Yang et al. (2019), demonstram avanços significativos em procedimentos de reciclagem. Métodos como tratamento térmico, deslaminação química e processos mecânicos de fragmentação e separação têm permitido a recuperação de grande parte dos materiais presentes nos módulos. Em alguns casos, é possível recuperar cerca de 95% do vidro, 90% do alumínio e 85% dos semicondutores, reduzindo a necessidade de produção de silício virgem e o consumo energético associado.

As principais categorias de impacto ambiental identificadas em estudos de ACV, segundo metodologias como ReCiPe, CML-IA e ILCD, incluem mudanças climáticas, eutrofização, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo energético acumulado e uso de recursos minerais e metálicos. A contribuição para mudanças climáticas está fortemente relacionada à produção de silício e ao consumo de energia nas etapas de manufatura.

Impactos de eutrofização e acidificação derivam, sobretudo, da mineração, do transporte e dos processos industriais envolvidos. As categorias de toxicidade, por sua vez, estão associadas ao uso de solventes, metais pesados e outras substâncias químicas utilizadas no corte e limpeza dos wafers. Além disso, o uso intensivo de materiais como alumínio, cobre e prata exerce pressão significativa sobre recursos minerais.

Apesar dos impactos identificados, a energia fotovoltaica permanece classificada como uma fonte limpa, especialmente quando consideradas as emissões evitadas durante décadas de operação. Ainda assim, a incorporação de uma análise completa do ciclo de vida, do berço ao túmulo, é essencial para identificar pontos críticos, orientar melhorias nos processos produtivos, ampliar a eficiência no uso dos recursos e avançar nas soluções de reciclagem.

4.4 Reciclagem e reaproveitamento de painéis.

Nesse tópico, são discutidos estudos que tratam o tema reciclagem dos painéis fotovoltaicos. A reciclagem de módulos fotovoltaicos ganha relevância à medida que a capacidade instalada de energia solar cresce rapidamente. Considerando que a vida útil desses módulos está estimada em torno de 25 a 30 anos, esse aumento contínuo pode levar a um volume significativo de resíduos fotovoltaicos no futuro, potencialmente milhões de toneladas. Gerenciar esse descarte de forma sustentável torna-se um desafio crítico, exigindo estratégias eficientes de reaproveitamento e reciclagem dos componentes (Santos, 2025).

Para Nevala et al. (2019) A primeira geração de painéis fotovoltaicos está começando a atingir o fim de sua vida útil, o que traz à tona a necessidade de soluções eficazes para o manejo desses resíduos. No entanto, ainda não há consenso sobre qual tecnologia apresenta maior eficiência e viabilidade para tratar esses materiais, especialmente quando se considera a importância de estratégias de reciclagem e gestão sustentável dos componentes fotovoltaicos, já discutidas em estudos recentes. De acordo com Li, Roskilly e Wang (2018), o volume atual de módulos fotovoltaicos que já atingiram o fim de sua vida útil ainda é insuficiente para que a indústria estabeleça um padrão consolidado para a gestão desses resíduos. Essa limitação dificulta a definição de diretrizes técnicas e operacionais mais robustas para o tratamento dos materiais provenientes desses sistemas. Lunardi et al. (2020) também apontam que ainda não existe uma padronização global para o gerenciamento e o descarte de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil.

4.5 Legislações Brasil para contribuir para gestão de resíduo.

Em 2023, o Senador Carlos Viana, iniciou o Projeto de Lei 3784/2023 que é uma iniciativa legislativa crucial que visa alterar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), estabelecendo a obrigatoriedade da logística reversa para painéis solares fotovoltaicos. O projeto exige que fabricantes, importadores, distribuidores e vendedores organizem e implementem sistemas para a coleta e destinação ambientalmente adequada desses materiais. A proposta busca conferir maior estabilidade normativa à gestão dos painéis solares, inserindo a responsabilidade diretamente na lei principal, o que garante uma diretriz mais perene e menos suscetível a alterações em normas complementares. O projeto encontra-se em tramitação no Senado Federal, aguardando análise em comissões, com o Senador Jayme Campos designado como relator.

O PL 3.784/2023 é o passo mais concreto do Brasil para alinhar-se ao modelo europeu. Sua aprovação transformaria a Logística Reversa de painéis solares, hoje voluntária, em uma obrigação legal baseada no princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor, exatamente como funciona na União Europeia.

No entanto, a diferença crucial é que a União Europeia já possui uma legislação detalhada e em vigor há mais de uma década, com metas de reciclagem definidas e infraestrutura financiada. O Brasil, mesmo com a aprovação do PL, ainda precisaria de um período de regulamentação secundária (decretos) para estabelecer as metas de reciclagem e os mecanismos de fiscalização, elementos que já são maduros no contexto europeu.

4.6 Proposta de Modelo Operacional: Da Logística Reversa à Recuperação de Materiais

A transição de um modelo de logística reversa voluntária para um regime de obrigatoriedade legal, conforme proposto pelo Projeto de Lei nº 3.784/2023, demanda não apenas avanços no campo normativo, mas também a estruturação de um modelo operacional capaz de viabilizar tecnicamente a gestão dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil. Nesse contexto, torna-se imprescindível o estabelecimento de diretrizes claras que assegurem o encerramento sustentável do ciclo de vida desses equipamentos no Brasil.

Dessa forma, propõe-se um modelo operacional fundamentado na responsabilidade compartilhada entre os agentes da cadeia produtiva e na maximização do aproveitamento dos materiais constituintes dos módulos fotovoltaicos, em consonância com os princípios da economia circular e da Avaliação do Ciclo de Vida.

4.6.1 Matriz de Responsabilidades e Responsabilidade Estendida do Produtor (REP)

A gestão eficiente dos resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos baseia-se no princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), no qual os encargos associados ao ciclo de vida do produto são distribuídos entre os diferentes elos da cadeia. Nesse modelo, as responsabilidades podem ser organizadas da seguinte forma:

Tabela 3 - Matriz de responsabilidades na logística reversa de módulos fotovoltaicos

Agente da Cadeia	Responsabilidades no Sistema de Logística Reversa
Fabricantes e Importadores	Atuam como os principais financiadores e organizadores do sistema de logística reversa, sendo responsáveis pela contratação de operadores logísticos e de unidades de tratamento e reciclagem devidamente licenciadas, assegurando a destinação ambientalmente adequada dos módulos fotovoltaicos desativados.
Distribuidores e Comerciantes	Exercem papel estratégico como pontos de recepção dos equipamentos ao final de sua vida útil, operando como Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e viabilizando a logística reversa no modelo 1:1, no qual o consumidor devolve o módulo usado no momento da aquisição de um novo.
Consumidores (residenciais e usinas)	Devem assegurar que os módulos fotovoltaicos não sejam descartados em fluxos convencionais de resíduos, sendo responsáveis por acionar o fornecedor, instalador ou operador do sistema de logística reversa quando do encerramento da vida útil do equipamento.
Setor Público	Compete ao Estado fiscalizar o cumprimento das metas de coleta e reciclagem, além de fomentar a cadeia por meio de incentivos fiscais e regulatórios à indústria que incorpora matérias-primas recicladas, fortalecendo a viabilidade econômica do sistema.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no Projeto de Lei nº 3.784/2023 e nos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

4.6.2 Exemplo de Fechamento de Ciclo

O fechamento efetivo do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos ocorre por meio de uma logística reversa capilarizada, estruturada para viabilizar a coleta, o transporte e o tratamento adequado desses equipamentos ao final de sua vida útil. Uma medida concreta para a operacionalização desse sistema seria a criação de Entidades Gestoras, nos moldes do que já ocorre no Brasil para pneus e baterias, responsáveis por centralizar os recursos financeiros das empresas do setor e otimizar as etapas de coleta e destinação.

Nesse contexto, o alumínio proveniente dos módulos desativados pode retornar às fundições para a fabricação de novos perfis estruturais, o vidro processado pode ser reaproveitado na indústria de vidros planos ou na construção civil, e o silício após processos de purificação, pode ser reintegrado à cadeia produtiva de semicondutores. Esse fechamento de ciclo contribui para a redução significativa da demanda por recursos naturais primários, além de consolidar a gestão de resíduos fotovoltaicos como um elemento estratégico da economia circular e da sustentabilidade do setor energético brasileiro.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos, desde a extração das matérias-primas até o tratamento ao final da vida útil, com ênfase na identificação e avaliação dos impactos ambientais associados a cada etapa. Para isso, utilizou-se como base metodológica a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme os princípios e diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, apoiando-se em uma abordagem bibliográfica e analítica.

A análise realizada evidenciou que, embora a energia solar fotovoltaica seja amplamente reconhecida como uma fonte limpa e renovável durante a fase de operação, seus impactos ambientais não são distribuídos de forma homogênea ao longo do ciclo de vida. Os resultados indicam que as etapas de extração e beneficiamento das matérias-primas, bem como a manufatura dos módulos, concentram a maior parcela dos impactos ambientais, principalmente devido ao elevado consumo energético, à utilização de recursos minerais e às emissões associadas aos processos industriais, em especial na produção e purificação do silício.

Por outro lado, a fase de uso dos sistemas fotovoltaicos apresenta impactos ambientais significativamente reduzidos, destacando-se pela geração de energia elétrica sem emissões diretas de gases de efeito estufa. Os dados analisados demonstram que o tempo de retorno energético dos módulos é relativamente curto quando comparado à sua vida útil média, reforçando a efetividade ambiental da tecnologia ao longo do tempo. Assim, apesar dos impactos iniciais, a energia produzida durante décadas de operação supera amplamente a energia consumida em sua fabricação.

A comparação entre diferentes tecnologias fotovoltaicas revelou que não existe uma solução única com desempenho ambiental superior em todos os aspectos. Tecnologias baseadas em silício monocristalino apresentam maior eficiência energética e menor degradação, porém demandam maior consumo energético em sua fabricação. Já os módulos policristalinos apresentam menor impacto inicial, mas eficiência ligeiramente inferior. Tecnologias de filmes finos, embora promissoras, ainda enfrentam desafios relacionados à toxicidade de materiais e à consolidação de processos de reciclagem.

Outro aspecto relevante identificado refere-se à etapa de fim de vida dos módulos fotovoltaicos. Embora tecnicamente viável, a reciclagem desses equipamentos ainda enfrenta limitações econômicas, tecnológicas e regulatórias, especialmente no contexto brasileiro. A

ausência de uma legislação específica consolidada e de infraestrutura adequada pode resultar na destinação inadequada de materiais potencialmente recicláveis. Nesse sentido, iniciativas legislativas recentes representam um avanço importante, ao buscar incorporar os painéis fotovoltaicos aos sistemas de logística reversa, alinhando o país às práticas internacionais.

Diante do exposto, conclui-se que a Avaliação do Ciclo de Vida constitui uma ferramenta essencial para compreender de forma integrada os impactos ambientais dos sistemas fotovoltaicos, permitindo a identificação de pontos críticos e oportunidades de melhoria. A ampliação do uso de matrizes elétricas menos intensivas em carbono na manufatura, o aumento da eficiência dos processos produtivos e o fortalecimento das cadeias de reciclagem são estratégias fundamentais para reduzir ainda mais os impactos ambientais associados à tecnologia fotovoltaica.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros avancem na realização de estudos quantitativos de ACV, com modelagem específica para o contexto brasileiro, bem como na análise comparativa entre diferentes cenários de reciclagem e políticas públicas. Essas iniciativas contribuirão para o aprimoramento da sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos e para o fortalecimento da transição energética rumo a uma matriz elétrica mais limpa, resiliente e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR**, 2023. **Panorama do solar fotovoltaico no Brasil e no mundo**. Disponível em:<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 12 de Out. 2025.
- AKATU. Nova rede de empresas pretende popularizar prática de análise de ciclo de vida de produtos no Brasil**. 2012. Disponível em: <https://www.akatu.org.br/>. Acesso em: dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT**. (2009a). NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT**. (2006). NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro.
- ANEEL**. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Atualizações e informes. 2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 03 dez. 2025.
- A ONU e o meio ambiente | As Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente> Acesso em: 07 de fev. 2026.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES)**. **Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da cadeia local de fornecedores**. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/28110>.
- BANDEIRA, F. P. M. Aproveitamento da energia solar no Brasil: Aproveitamento e perspectivas**. Disponível em:
http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento_energia_bandeira.pdf?sequence=2
- BEZERRA, J. L.; ANTONIO, M.; APARECIDA, E. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA A PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1 dez. 2018.

BOFF, L. **Sustentabilidade: O que é – O que não é.** Petrópolis, RJ: Vozes, 2017.

BORGES, P. P.; et al. **Revisão sistemática sobre ACV e absorção de carbono.** Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENARC, 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/4630>. Acesso em: 03 dez. 2025.

BRASKEM. Braskem divulga atualizações de Avaliação de Ciclo de Vida do portfólio I'm green bio-based. Conecta Verde, 2023. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/>. Acesso em: dez. 2025.

CARPENTER, A. et al. **Next-generation life cycle assessment: addressing uncertainty, temporal dynamics and circularity.** *Journal of Cleaner Production*, v. 460, 2024.

CRESESB - Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito; **Energia Solar: Princípios e Aplicações.** Tutorial Solar, 2006.

COELHO FILHO, O.; LUI, N. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil.** Brasília: Ipea, 2016.

CUNHA, P. D. **Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo.** Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental, 2016.

CONSTANTINO, Gabriel et al. **Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path:A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts.** *Energies*, v. 11, n. 2806, 28 p., 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023.** Brasília: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 03 dez. 2025.

ESCOBAR, J.C.; E.S. LORA, O.J.; VENTURINI, E.; CASTILLO E.F. **Biofuels: environment, technology and food security.** 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032108001329>>. Acesso em 13 de Set. 2023.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000.** Rio de Janeiro: Qualitymark, CNI, 1997.

DALMORA, G.; LUZZI, K.; HEMKEMEIER, M. **A contribuição da análise do ciclo de vida (acv) para a minimização dos impactos ambientais de processos produtivos: uma abordagem teórica.** Recima21,2023.

DNV - Det Norske Veritas, **GL 2018 PV Module Reliability Scorecard Report.** 2018.

FAGUNDES, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica.** GEPEA - Grupo de Energia Escola Politécnica, 2012.

FGV EAESP. **Análise da aplicação do pensamento de ciclo de vida na gestão empresarial: estudo de casos brasileiros.** São Paulo: FGV, s.d. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/>. Acesso em: dez. 2025.

FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., KOEHLER, A., PENNINGTON, D., & SUH, S. **Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management,** PMid:19716647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman>. (2009).

FRANCO, A.P. **Sistemas Fotovoltaicos: contextualização e perspectivas para sua massificação no Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Lavras. 2013.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **Photovoltaics report.** Freiburg: Fraunhofer ISE, 2024. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de>. Acesso em: 08 dez. 2025.

FILHO, W. P. B. et al. **Expansão da energia solar fotovoltaica no brasil: impactos ambientais e políticas públicas.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 4, p. 628–642, 7 dez. 2015.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 6. ed. São Paulo: Atlas. 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe 2016: A harmonized life-cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.** The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, p. 138–147, 2017.

IBICT. **LIS divulga questionário para usuários de ACV.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibict/>. Acesso em: dez. 2025.

IBICT. **O que é Avaliação do Ciclo de Vida,** 2024. Disponível em:<https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em 08 dez 2025.

IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 03 dez. 2025.

KLÖPFFER, W. **The role of SETAC in the development of LCA.** International Journal of Life Cycle Assessment, [http://dx.doi.org/10.1007/\(2006\)](http://dx.doi.org/10.1007/(2006)).

KONZEN, B. **Avaliação do ciclo de vida de painel fotovoltaico: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LATUNUSSA, G.; et al. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 156, p. 101-111, 2016.

LEMOS, H. M.; BARROS, R. L. P. **Ciclo de vida dos produtos: certificação e rotulagem ambiental.** Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro das Nações Unidas para o Meio Ambiente, SEBRAE, 2006.

LI, T.; ROSKILLY, A. P.; WANG, Y. **Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England.** Applied Energy, v. 227, p. 465–479, out. 2018.

LINDFELDT, E.G.; WESTERMARK, M.O. **Biofuel production with CCS as a strategy for creating a CO₂-neutral road transport sector.** 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610209008625>> Acesso em 13 de Set. 2023.

LIPMAN, A. **IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change | The SUNx Program.** Disponível em: <<https://www.thesunprogram.com>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

LOPES, L. F. da R. **Importância da energia renovável para o meio ambiente.** 2011. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) – Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro, 2011.

LUZ, L.M. **Proposta de modelo para avaliar as contribuições dos indicadores obtidos na análise do ciclo de vida sobre a geração de inovação na indústria.** Universidade Tecnológica do Paraná: Dissertação de Mestrado apresentada para o programa de pós-graduação em engenharia de produção, Ponta Grossa, 2011.

MELLO, A. F. **Avanços metodológicos em Avaliação do Ciclo de Vida e suas aplicações em sustentabilidade.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 2022.

MORAIS, Luciano Cardoso de. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no brasil e tendências futuras.** 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unesp, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2015.

NEVALA, S.-M. et al. **Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling.** Waste Management, v. 87, p. 43–50, 15 mar. 2019.

NREL. **National Renewable Energy Laboratory (NREL).** Disponível em: <<https://www.nrel.gov/>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

OLIVEIRA, D. S.; WANDERLEY, T. S. **Barreiras técnicas e econômicas na adoção da energia solar: um estudo bibliográfico.** Revista Multidisciplinar do UNIPACTO, 2023. Disponível em: <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/3154>.

PORTAL SOLAR. Passo a passo da fabricação do painel solar - Tudo sobre energia solar fotovoltaica, 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>.

PORTAL SOLAR. A importância da reciclagem de equipamentos de energia solar, 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/a-importancia-da-reciclagem-de-equipamentos-de-energia-solar>>. Acesso em 17 dez 2025.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. de.; RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHEIRO, S; CARVALHO, R; MACHADO, F. Políticas públicas do Brasil para expansão da energia solar fotovoltaica na geração distribuída: uma revisão da literatura no período 2011-2021. InterSciencePlace, v. 18, n. 1, 2023.

PINTO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL-CRESESB, mar. 2014.

PV CYCLE. About PV Cycle. 2016. Disponível em: <https://pvcycle.it/en/chi-siamo-pv-cycle> Acesso em: 14 out de 2025.

REDE ACV. O que é ACV, 2020. Disponível em: <<https://redeacv.org.br/pt-br/o-que-e-acv>>. Acesso em: 8 dez. 2025.

RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL COMPLEXO MUNDO NOVO I, II, III e IV RIMA. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2020/01/RIMA_MUNDONOVO.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2025.

REDE ACV. Bases de dados de Inventários do Ciclo de Vida. 2020. Disponível em: <http://redeacv.org.br/>. Acesso em: dez. 2025.

RIFKIN, J. A Terceira Revolução Industrial: Como o Poder Lateral está Transformando a Energia, a Economia e o Mundo. São Paulo, SP: M.Books, 2021.

SACHS, I. **A terceira margem: em busca do desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Companhia das Letras, 2015.

SANTOS, J. A. B.; MONTE, R.; SILVA, F. B. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) de materiais e sistemas de impermeabilização.** 2023, Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003167697>. Acesso em: 08 Dez de 2025.

SANTOS, A. M. **Reciclagem e gestão sustentável de resíduos fotovoltaicos: tendências e desafios futuros.** 2025.

FARIAS, L.M.; Sellitto ,M.A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.** Revista Liberato (Novo Hamburgo), 2011.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: Sistemas isolados e conectados à rede.** 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** *Production*, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000037>, Acesso em 08 dez 2025.

WOYTE, A.; NIJS, J.; BELMANS, R. **Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results.** Solar Energy, 2003.

WERNER, Eliakim Macedo. **Energias renováveis no contexto governamental: estudo do uso de energia solar fotovoltaica no estado de Minas Gerais.** – Escola de Governo Professor Paulo Neves de Carvalho, Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, 2021.

YANG, H. L. et al. **Recycling and reuse of kerf-loss silicon from diamond wire sawing for photovoltaic industry.** Waste Management, v. 84, p. 204–210, fev. 2019.

XU, L. et al. **Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011–2016: A life cycle assessment approach.** Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 310–329, jan. 2018.