



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana

VINNY RAFAEL RODRIGUES GODOY

Estratégias Sustentáveis para o Descarte de Painéis Solares: Desafios da Reciclagem e Reutilização no Final do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos

Rosana - SP
2024

VINNY RAFAEL RODRIGUES GODOY

Estratégias Sustentáveis para o Descarte de Painéis Solares: Desafios da Reciclagem e Reutilização no Final do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia do Campus de Rosana, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Energia.

Orientador(a): Profa. Dra. Maria Claudia Botan

Rosana - SP
2024

G589e

Godoy, Vinny Rafael Rodrigues

Estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares: : desafios da reciclagem e reutilização no final do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos /

Vinny Rafael Rodrigues Godoy. -- Rosana, 2024

40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e
Ciências, Rosana

Orientadora: Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

1. Painéis Solares. 2. Reutilização. 3. Impacto ambiental. 4. Descarte sustentável. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana

VINNY RAFAEL RODRIGUES GODOY

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Kleber Rocha de Oliveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Maria Cláudia Costa de Oliveira Botan
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos
UNESP-Rosana

Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira
UNESP-Rosana

Novembro 2024

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor e pelo apoio inabalável em todos os momentos. As amizades feitas, por estarem sempre presentes e por acreditarem no meu potencial. E aos meus professores, colegas e funcionários, pela troca de conhecimentos e experiências que enriqueceram minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me dar forças para finalizar o curso de Engenharia de Energia na FEC UNESP. Agradeço minha família, pelo apoio incondicional e pelo amor constante que me motivou a seguir em frente. Aos meus pais e meu irmão, Gilnei, Surley e João Francisco, por acreditarem em mim e me derem forças, e incentivarem a perseguir meus sonhos. Aos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado, oferecendo suporte e compartilhando momentos de alegria e desafio.

Aos meus professores e em especial a minha orientadora Maria Claudia Costa de Oliveira Botan, pela paciência, dedicação e orientação ao longo de toda a trajetória acadêmica. Aos colegas de curso, pela parceria e colaboração que tornaram essa jornada mais rica e significativa. Além disso, gostaria de expressar minha profunda gratidão à ENGPONTAL Engenharia e Comércio LTDA. pela oportunidade de estágio. A experiência e o conhecimento adquiridos durante este período foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço a toda a equipe pela acolhida, pelo suporte e pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para a conclusão deste curso. E, por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho. Esta conquista é resultado do esforço e do apoio de todos vocês.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco;
à medida que vamos adquirindo conhecimento,
instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso, intitulado "Estratégias Sustentáveis para o Descarte de Painéis Solares: Desafios da Reciclagem e Reutilização no Final do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos", visa analisar estratégias sustentáveis que possam ser aplicadas ao descarte de painéis solares, reunindo abordagens de reciclagem e reutilização. A pesquisa identifica os desafios tecnológicos e ambientais envolvidos e avalia políticas públicas que incentivam a economia circular, visando minimizar os impactos ambientais e promover uma gestão eficaz dos resíduos fotovoltaicos. A questão central da investigação busca determinar quais estratégias são mais eficazes e sustentáveis, considerando os desafios e as soluções tecnológicas disponíveis, bem como as políticas vigentes. Tal abordagem holística é crucial para a criação de soluções práticas e inovadoras, que não apenas prolonguem a vida útil dos materiais, mas também contribuam para um modelo de produção e consumo mais circular e menos impactante ao meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Painéis Solares. Reutilização. Impacto Ambiental. Descarte Sustentável.

ABSTRACT

This final course project, titled "Sustainable Strategies for the Disposal of Solar Panels: Challenges of Recycling and Reuse at the End of Photovoltaic Panels' Life Cycle," aims to analyze sustainable strategies for disposing of solar panels by combining recycling and reuse approaches. The research identifies the technological and environmental challenges involved and evaluates public policies that encourage a circular economy, aiming to minimize environmental impacts and promote effective management of photovoltaic waste. The central question of the investigation seeks to determine which strategies are most effective and sustainable, considering the challenges and available technological solutions, as well as current policies. Such a holistic approach is crucial for creating practical and innovative solutions that not only extend the lifespan of materials but also contribute to a more circular and less environmentally impactful production and consumption model.

KEYWORDS: Solar Panels. Reuse. Environmental Impact. Sustainable Disposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de Ofertas de Energia, Perdas e Consumo Final	16
Figura 2 - Participação das renováveis na oferta interna de energia (OIE).....	16
Figura 3 - Participação das Fontes Renováveis na Matriz Energética.	17
Figura 4 - Participação das fontes energéticas na oferta interna de energia (OIE) de 2014 a 2023. Destaque para o aumento das fontes solar e eólica.	18
Figura 5 - Destacando o crescimento na geração de energia eólica e solar, bem como a estabilidade do regime hídrico.....	18
Figura 6 - Renovabilidade da matriz elétrica brasileira em 2023, considerando apenas o Sistema Interligado Nacional (SIN).	19
Figura 7 - Fabrica de Reciclagem de Painéis na França.....	23
Figura 8 - Painel solar fotovoltaico em estado inutilizável.	24
Figura 9 - Composição de um módulo fotovoltaico, destacando os diferentes materiais e suas respectivas porcentagens, indicando os componentes recicláveis (ENERGÊS, 2020).	25
Figura 10 - Fluxograma dos processos de reciclagem de uma placa solar, destacando cada etapa do processo.....	25
Figura 11 - Perspectiva global sobre resíduos de painéis solares.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	12
2.1. Evolução da Oferta de Energia no Brasil em 2023: Desafios e Perspectivas..	14
2.2. Panorama do Consumo Energético no Brasil Referente ao Ano de 2023	15
2.3. Avanços e Impactos da Energia Solar no Brasil.....	18
2.4. Crescimento da Energia Solar e Implicações Ambientais	20
2.4.1. Tecnologias de Reciclagem de Painéis Solares	22
2.4.2. A Reciclagem ao Redor do Mundo.....	27
2.4.3. Economia Circular e Sustentabilidade	30
2.4.4. Políticas Públicas e Regulação Internacional.....	31
3. METODOLOGIA.....	32
4. RESULTADOS.....	33
5. DISCUSSÃO	34
6. CONCLUSÃO.....	36

1. INTRODUÇÃO

A crescente adoção de painéis solares fotovoltaicos como fonte de energia renovável representa um avanço significativo em direção a um futuro mais sustentável. No entanto, com o aumento da instalação destes sistemas, surge um novo desafio: o descarte e reaproveitamento dos painéis solares ao final de seu ciclo de vida. A eficiência energética e a sustentabilidade dos recursos necessitam ser acompanhadas por estratégias eficazes de gestão de resíduos, especialmente diante dos impactos ambientais que resultam do descarte inadequado de materiais fotovoltaicos.

O presente trabalho tem como objetivo analisar estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares, destacando as alternativas de reciclagem e reutilização dos componentes. A indústria fotovoltaica, em rápida expansão, enfrenta o desafio de desenvolver soluções tecnológicas que permitam a recuperação de materiais valiosos, minimizando os impactos negativos sobre o meio ambiente. De acordo com Prado e Espinosa (2018), a reciclagem de painéis fotovoltaicos e a recuperação de metais apresentam grande potencial de contribuição para uma economia circular, capaz de reduzir significativamente o volume de resíduos.

Nesse contexto, a avaliação de políticas públicas que promovam práticas circulares é essencial para garantir que os benefícios ambientais da energia solar sejam plenamente realizados. Estudos sobre a recuperação do vidro, como alternativa ao descarte de painéis, mostram que a implementação de políticas de incentivo pode ser decisiva para aumentar a taxa de reciclagem e viabilizar a gestão sustentável de resíduos. As políticas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento, juntamente com a educação ambiental, são fundamentais para a transição rumo a práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis.

A pergunta principal deste estudo é: Quais são as estratégias mais eficazes e sustentáveis para o descarte, reciclagem e reutilização de painéis solares fotovoltaicos no final de seu ciclo de vida, considerando os desafios tecnológicos, ambientais e as políticas públicas vigentes? Responder a esta questão implica em identificar soluções inovadoras que assegurem a reutilização de materiais e promovam o desenvolvimento de tecnologias de separação e processamento eficientes.

Portanto, abordar os desafios associados ao final do ciclo de vida dos painéis solares é crucial para mitigar os impactos negativos da sua expansão como fonte de energia limpa. Este trabalho discute as variáveis tecnológicas, econômicas e políticas que podem influenciar o sucesso das estratégias de descarte sustentável, contribuindo para o desenvolvimento de diretrizes claras e práticas para a gestão de resíduos fotovoltaicos. Além disso, busca-se

fomentar a incorporação dessas práticas na agenda das indústrias e dos formuladores de políticas, visando um futuro cada vez mais sustentável.

A reciclagem de painéis solares é um dos pilares para alcançar um ciclo sustentável de vida para esses dispositivos. A tecnologia de reciclagem atual permite recuperar materiais valiosos como o vidro, alumínio e silício, o que contribui para a redução do consumo de novos recursos naturais. Contudo, os desafios tecnológicos, como a eficiência dos processos de separação dos materiais e o custo operacional da reciclagem, ainda são barreiras significativas para a implementação em larga escala. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias pode ajudar a melhorar a taxa de recuperação e pureza dos materiais.

Paralelamente, a reutilização de componentes fotovoltaicos após a desativação dos painéis é uma alternativa a ser explorada. Componentes como quadros, cabos e semicondutores podem ser reaproveitados em novos produtos, diminuindo ainda mais a necessidade de extração e processamento de novos materiais. A implementação de estratégias de reutilização requer, no entanto, um redesenho dos processos de produção e do design dos painéis para facilitar o resgate dos componentes em bom estado.

Em termos de política pública, o incentivo a uma economia circular na área fotovoltaica é crucial para criar um ambiente favorável para a reciclagem e reutilização dos painéis solares. Políticas eficazes podem incluir subsídios governamentais, isenções fiscais para empresas que adotam práticas sustentáveis e o estabelecimento de regulamentos claros sobre a responsabilidade de fabricantes e usuários no tratamento dos resíduos fotovoltaicos. Além disso, a legislação deve favorecer o desenvolvimento de infraestrutura necessária para suportar estas práticas em escala.

Em suma as estratégias para o descarte sustentável de painéis solares devem abordar não apenas os desafios tecnológicos e ambientais, mas também aproveitar oportunidades de política e economia circular para fomentar práticas sustentáveis. A combinação de desenvolvimento tecnológico, suporte político e conscientização social cria um caminho resiliente para enfrentar os desafios da reciclagem e reutilização de painéis solares.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A crescente adoção de painéis solares fotovoltaicos ao redor do mundo traz consigo a necessidade urgente de desenvolver estratégias eficazes para o descarte e a reciclagem desses materiais no final de seus ciclos de vida. A sustentabilidade, nesse contexto, não é apenas uma opção, mas uma obrigação, dada a quantidade significativa de resíduos que esses painéis podem gerar. O desafio central envolve a reciclagem e a reutilização dos componentes dos painéis solares, visando minimizar o impacto ambiental negativo e promover um ciclo de vida mais sustentável.

De acordo com Oliveira (2019), a reciclagem de painéis solares apresenta desafios técnicos e econômicos consideráveis. Os módulos fotovoltaicos, compostos de materiais complexos como silício, alumínio e vidro, requerem processos especializados para a separação e recuperação eficaz dos componentes. Essas técnicas ainda estão em fase de desenvolvimento e são limitadas por questões de custo e eficiência. Neste cenário, o incentivo à pesquisa tecnológica para aprimorar as técnicas de reciclagem torna-se essencial.

Uma solução promissora envolve o desenvolvimento de processos para a recuperação de metais valiosos presentes nos painéis solares, como prata e cobre, tornando a reciclagem economicamente viável. Estudos indicam que esses metais não são apenas essenciais para o funcionamento dos painéis, mas também possuem um mercado secundário lucrativo, o que pode subsidiar parte dos custos de reciclagem. Além disso, a reciclagem de componentes não metálicos, como vidro, é igualmente importante e pode ser facilitada por processos de separação mecânica (Luo et al., 2024).

Outro aspecto crucial diz respeito à normatização e à política de gerenciamento de resíduos fotovoltaicos, sendo necessário um marco regulatório claro que incentive a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, consumidores e recicladores. A legislação pode estabelecer metas de reciclagem obrigatórias e suporte financeiro para inovação no setor, criando assim um ciclo fechado e sustentável para o uso dos materiais (Reis et al., 2024).

A reutilização é uma estratégia complementar que pode prolongar a vida útil dos painéis solares, adiando a necessidade de descarte. Embora os estudos sobre a viabilidade técnica da reutilização de componentes de painéis desativados em novas aplicações ainda sejam limitados, há um potencial significativo nos setores industriais e na arquitetura sustentável. Essas práticas não apenas estendem o ciclo de vida dos materiais, mas também ajudam a reduzir os custos envolvidos na produção de novos painéis (Silva et al., 2024).

Além disso, a educação e a conscientização ambiental desempenham um papel vital na promoção de práticas sustentáveis. A implementação de programas educacionais que destacam os benefícios da reciclagem e a importância do descarte adequado pode aumentar a taxa de participação comunitária nos programas de coleta e reciclagem. A participação dos consumidores é crucial para o sucesso desses esforços, pois um consumidor bem informado está mais propenso a reciclar e a apoiar políticas que fomentam a sustentabilidade (Silva et al., 2024).

Portanto, enfrentar os desafios do descarte sustentável de painéis solares é uma tarefa complexa que exige a colaboração de diversos setores da sociedade. Tecnologia avançada de reciclagem, políticas públicas abrangentes e envolvimento comunitário são elementos-chave para o manejo adequado dos resíduos fotovoltaicos. Promover a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem e reutilização, enquanto se cria uma infraestrutura de suporte através de políticas e educação, intensificará os esforços para uma economia circular no setor fotovoltaico (Silva et al., 2024).

O descarte sustentável de painéis solares se tornou uma preocupação crescente devido ao aumento do uso de tecnologia fotovoltaica para a produção de energia limpa. Com a popularização dos painéis solares, muitos dispositivos deverão ser descartados nos próximos anos, exigindo estratégias eficazes e ecologicamente adequadas. Isso apresenta desafios significativos para a reciclagem e reutilização, essenciais para sustentar o conceito de economia circular e minimizar o impacto ambiental (Agência Internacional de Energia Renovável, 2024).

Componentes dos painéis solares, como vidro, silício e metais pesados, podem ser reciclados; porém, o processo ainda é incipiente em muitos lugares e economicamente inviável sem políticas públicas claras e incentivos financeiros. Estudos sugerem que a reciclagem de painéis fotovoltaicos pode ser uma alternativa vantajosa ao descarte tradicional, recuperando materiais valiosos para reintrodução na cadeia de produção (Fundo Ambiental, 2024).

Além das questões econômicas, há desafios técnico-científicos na reciclagem. A complexidade de desmontar e separar eficientemente os materiais dos painéis solares ainda carece de inovações que tornem o processo mais sustentável e menos oneroso. Pesquisas indicam a necessidade de métodos mais eficientes de separação e purificação para recuperar elementos como prata e silício, que têm alta demanda industrial (ROSI, 2024).

Uma abordagem promissora é o design sustentável, onde painéis são fabricados pensando em sua desmontagem e reciclagem ao fim do ciclo de vida. Isso facilita a recuperação de materiais e reduz custos futuros, aumentando a sustentabilidade da tecnologia. A implementação dessas práticas depende da colaboração entre governos, indústrias e

comunidades científicas para desenvolver padrões e legislações que promovam a economia circular. (BloombergNEF, 2024).

A reutilização de painéis solares, embora menos explorada, pode contribuir significativamente para a redução de resíduos. Painéis ainda funcionais ou com defeitos menores podem ser reconicionados para usos em contextos menos exigentes, como áreas rurais ou para dispositivos de baixa potência (Silva et al., 2023).

Educação e conscientização sobre a importância do manejo adequado de painéis fotovoltaicos são cruciais. Iniciativas para aumentar a compreensão pública sobre os impactos ambientais e práticas recomendadas de descarte são essenciais para engajar a sociedade. (Mendes et al., 2024).

Criar redes de logística reversa pode alinhar interesses de fabricantes, consumidores e recicladores, facilitando o fluxo de materiais de volta ao processo produtivo. Isso incentiva práticas sustentáveis e agrega valor econômico ao ciclo de vida dos produtos (Renovables Verdes, 2024).

Enfrentar os desafios da reciclagem e reutilização de painéis solares requer um esforço coordenado em frentes tecnológicas, econômicas, educativas e políticas. Somente através de uma abordagem integrada será possível realizar o potencial das estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares, promovendo uma economia circular (Canal Solar, 2024).

2.1. Evolução da Oferta de Energia no Brasil em 2023: Desafios e Perspectivas

Em 2023, a oferta interna de energia no Brasil, que representa o total de energia disponível no país, atingiu 313,9 Mtep, marcando um aumento de 3,5% em relação ao ano anterior. A participação de fontes renováveis na matriz energética foi destacada pela estabilidade na oferta de energia hidráulica, o crescimento na geração eólica e solar fotovoltaica, e a redução no uso de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis, como gás natural e derivados de petróleo (ANEEL, 2024).

A manutenção da oferta hidráulica, combinada com o expressivo aumento das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica, bem como o uso da biomassa, contribuíram para que a matriz energética brasileira se mantivesse em um patamar de 49,1% de fontes renováveis. Esse índice é muito superior ao observado no resto do mundo e nos países da OCDE, reforçando o compromisso do Brasil com a sustentabilidade (Filho et al., 2021).

No que diz respeito à energia elétrica, verificou-se um crescimento na oferta interna de 33,2 TWh, o que representa um aumento de 4,8% em relação a 2022. Os principais destaques

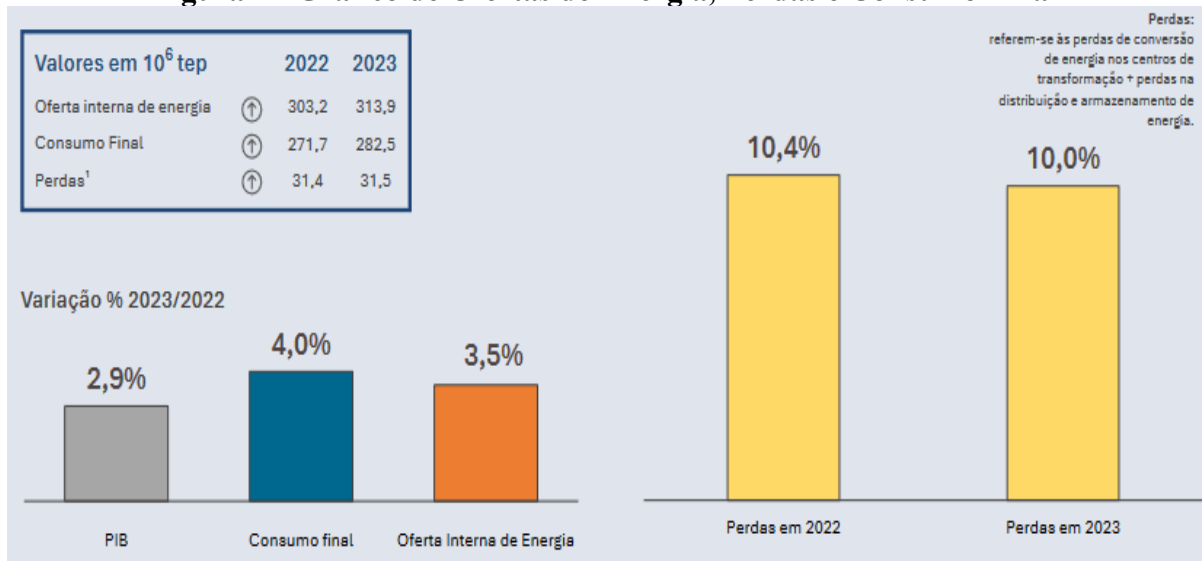
incluem a participação de 89,2% de fontes renováveis na matriz elétrica em 2023. A geração solar fotovoltaica atingiu 50,6 TWh, abrangendo tanto a geração centralizada quanto a microgeração distribuída, o que representa um crescimento de 68,1%, e a capacidade instalada alcançou 37.843 MW, uma expansão de 54,8% em relação ao ano anterior. A geração hidrelétrica permaneceu praticamente estável, com uma leve redução de apenas 1,1 TWh, representando uma queda de 0,3% em relação a 2022. A geração eólica atingiu 95,8 TWh, um crescimento de 17,4%, e sua potência instalada chegou a 28.682 MW, uma expansão de 20,7%. Houve também uma queda de 1,9% na geração termelétrica, refletindo um movimento em direção a fontes de energia mais limpas (ANEEL, 2024).

O consumo final de eletricidade no Brasil registrou um crescimento de 5,2%. Os setores que mais contribuíram para esse aumento em termos absolutos foram o setor Residencial, que cresceu 14,1 TWh (+9,1%), seguido pelo setor Comercial, com um aumento de 6,9 TWh (+7,1%). O setor Industrial também apresentou um crescimento significativo de 5,7 TWh (+2,6%), enquanto o setor Agropecuário teve um incremento de 1,5 TWh (+4,6%) (ANEEL, 2024).

2.2. Panorama do Consumo Energético no Brasil Referente ao Ano de 2023

A quantidade de energia consumida no Brasil é substancial, refletindo o desenvolvimento econômico e as necessidades da população. Segundo o BEN (2024), a Figura 1 ilustra o consumo final, oferta interna e perdas de energia nos anos de 2022 e 2023. Os dados indicam um consumo final de 4,0% e uma oferta interna de energia de 3,5%. As perdas de energia foram de 10,4% em 2022 e 10,0% em 2023. A **Figura 1** explica que as perdas se referem às perdas nos centros de transformação, distribuição e armazenamento de energia. Essa análise é crucial para entender a eficiência do sistema energético brasileiro e identificar áreas para melhorias.

Figura 1 - Gráfico de Ofertas de Energia, Perdas e Consumo Final

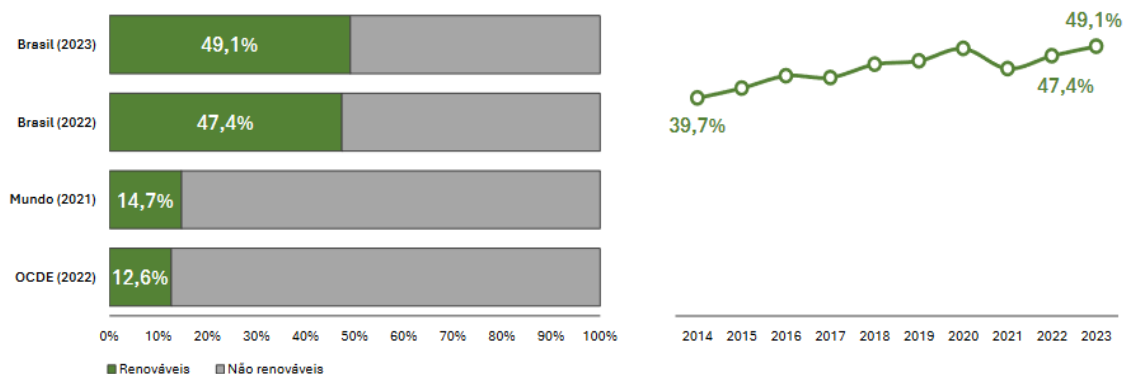


Fonte: BEN, 2024.

A participação de fontes renováveis na matriz energética foi marcada pelo aumento da oferta interna de biomassa, eólica e solar. A energia hidráulica manteve-se estável com regime hídrico favorável. É evidente que a participação das energias renováveis na matriz energética do país está crescendo rapidamente, superando expectativas ano após ano. Segundo o BEN (2024), **Figura 2**, "Participação das Renováveis na OIE", observa-se esse crescimento acelerado e a diversificação das fontes renováveis.

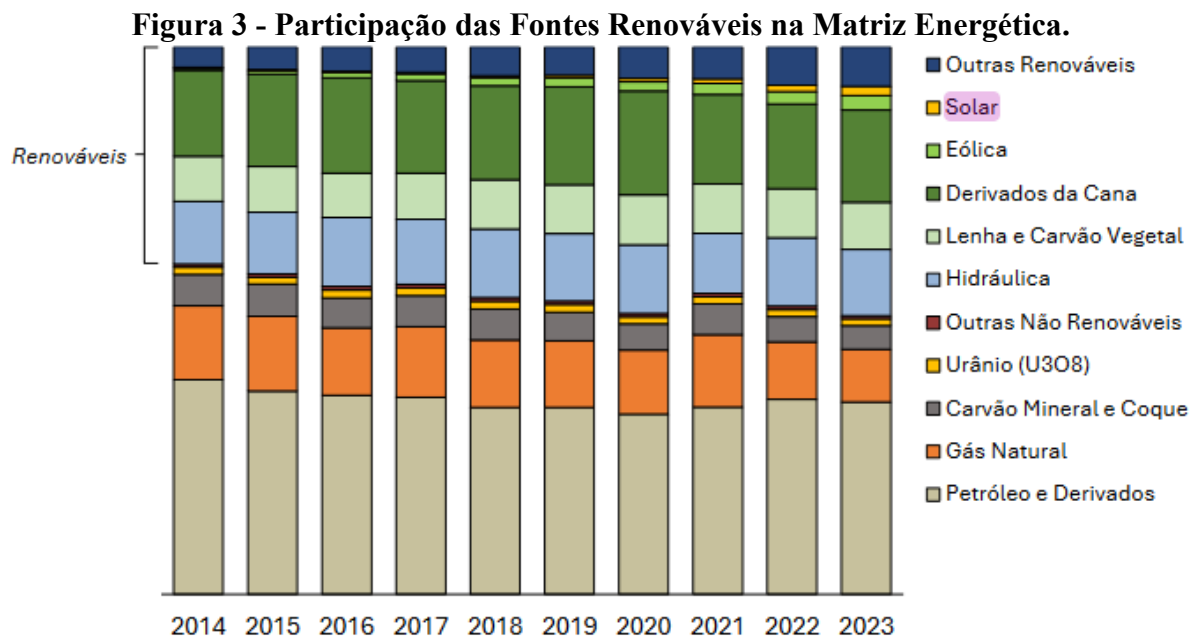
A **Figura 2** destaca não apenas a contribuição crescente de fontes como a biomassa, a energia eólica e a solar, mas também a estabilidade da energia hidráulica. Comparado ao cenário mundial, a matriz energética brasileira se mostra cada vez mais verde, refletindo políticas públicas e investimentos em tecnologias sustentáveis que visam reduzir a dependência de fontes fósseis e melhorar a eficiência energética.

Figura 2 - Participação das renováveis na oferta interna de energia (OIE).



Fonte: BEN, 2024.

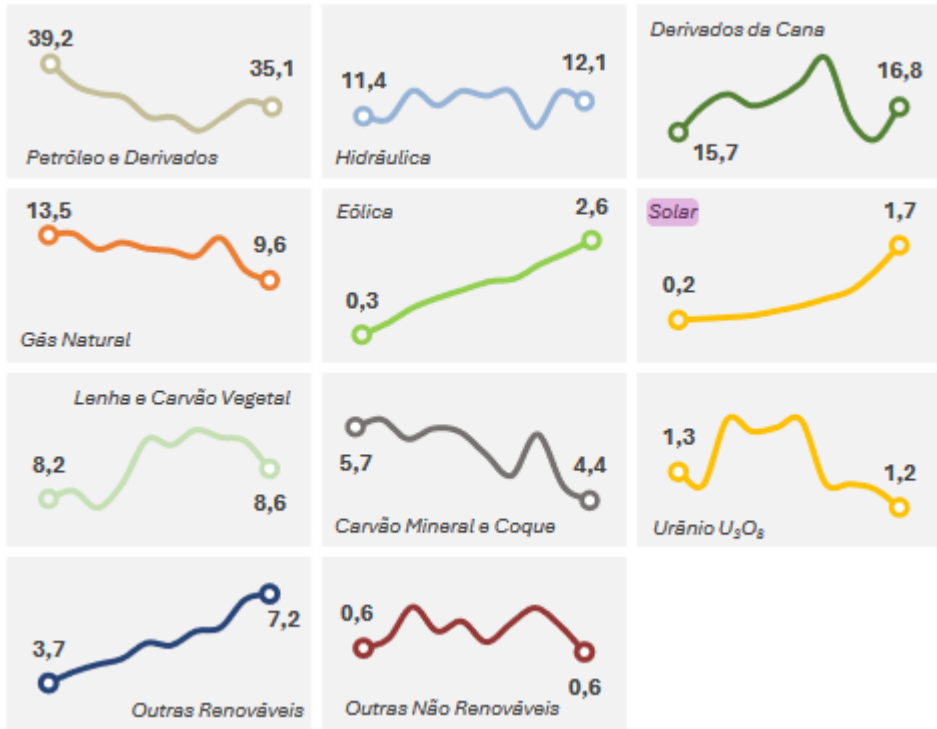
Em 2014, a participação das fontes renováveis na matriz energética diminuiu devido à redução na oferta de energia hidráulica. A partir de 2015, no entanto, as energias renováveis retomaram um crescimento contínuo, alcançando 45% de participação em 2021 e 49,1% em 2023. Segundo a ANEEL (2024), esse aumento foi impulsionado principalmente pela maior geração de eletricidade a partir de biomassa e, também, das fontes eólica e solar. Conforme ilustrado na **Figura 3**, é possível observar essa tendência ascendente.



Fonte: BEN, 2024.

Os gráficos da Figura 4 mostram a participação das diversas fontes energéticas na OIE (%) ao longo dos anos de 2014 a 2023. Segundo o BEN (2024), observa-se o significativo aumento das fontes solar e eólica, bem como dos derivados da cana-de-açúcar.

Figura 4 - Participação das fontes energéticas na oferta interna de energia (OIE) de 2014 a 2023. Destaque para o aumento das fontes solar e eólica.

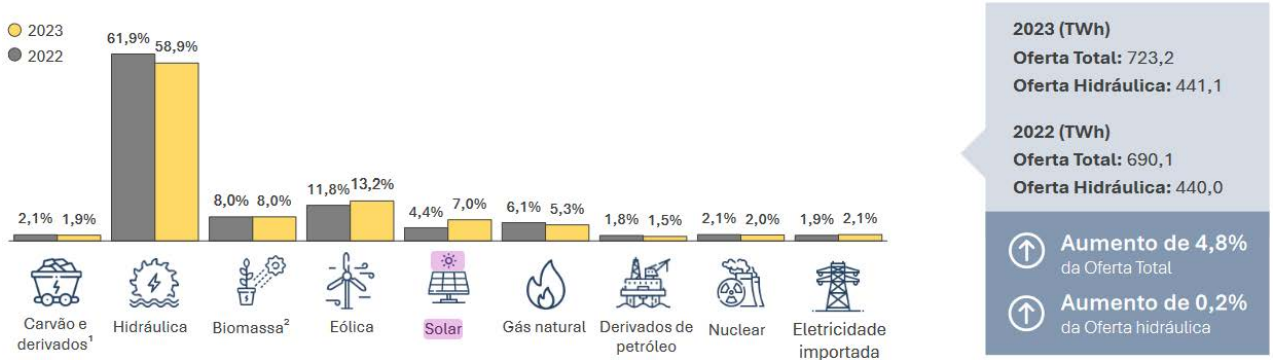


Fonte: BEM, 2024.

2.3. Avanços e Impactos da Energia Solar no Brasil.

A matriz elétrica brasileira em 2023 sofreu transformações significativas devido à estabilidade do regime hídrico e ao expressivo crescimento na geração de energia eólica e solar. Segundo o BEN (2024), conforme representado na **Figura 5**, esses aumentos na capacidade de geração renovável reforçam o compromisso do Brasil com fontes de energia mais sustentáveis, destacando a importância dessas fontes para a matriz energética nacional.

Figura 5 - Destacando o crescimento na geração de energia eólica e solar, bem como a estabilidade do regime hídrico.

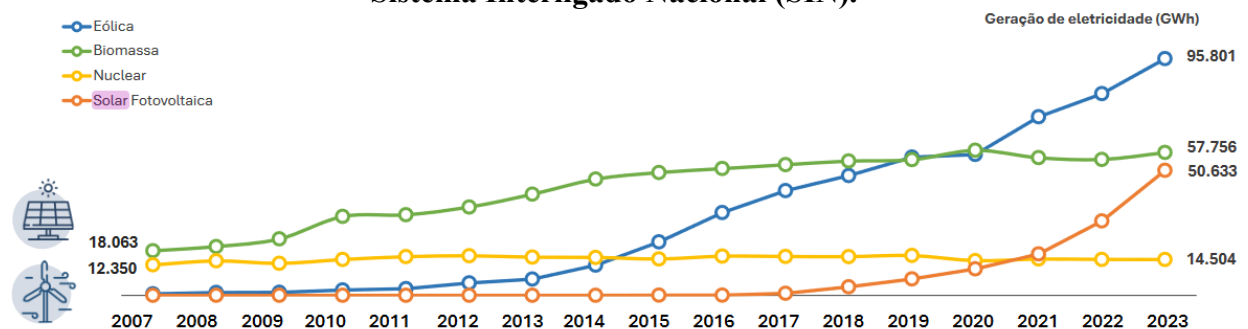


Fonte: BEM, 2024.

Considerando apenas o Sistema Interligado Nacional (SIN) e excluindo os Sistemas Isolados, a Importação de Eletricidade, a Autoprodução não injetada na rede e a MMGD, a renovabilidade da matriz elétrica brasileira alcançou 93% em 2023. Conforme ilustrado na **Figura 6**.

Esse aumento na renovabilidade se deve à manutenção da oferta hidráulica, ao crescimento da geração eólica e solar, e à redução da geração termelétrica não-renovável. Segundo a ANEEL (2024), analisando a geração elétrica em 2023, observa-se que essa combinação de fatores contribuiu significativamente para elevar a renovabilidade da matriz elétrica.

Figura 6 - Renovabilidade da matriz elétrica brasileira em 2023, considerando apenas o Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: BEM, 2024.

Nos últimos anos, o Brasil tem vivenciado um aumento notável na geração de energia solar, como demonstram os dados apresentados. Embora o país ainda seja um pequeno produtor de resíduos fotovoltaicos em comparação com o cenário mundial, ele se destaca como um dos mercados mais promissores do mundo. Este avanço é evidente nos dados recentes que mostram uma evolução notável na capacidade instalada de energia solar no país.

Em 2022, o Brasil entrou pela primeira vez no TOP 10 mundial de geração solar, alcançando a 8ª posição com 24 GW de capacidade instalada (Filho et al., 2021). Esse avanço foi impulsionado por uma série de investimentos no setor solar, destacando a crescente importância dessa fonte de energia na matriz elétrica brasileira. No início de 2024, o Brasil superou a marca de 40 GW de capacidade instalada de energia solar, reafirmando seu papel como um dos mercados que mais crescem no mundo (ANEEL, 2024).

Este crescimento robusto reflete não apenas os investimentos contínuos, mas também a adoção de políticas públicas favoráveis e o aumento da conscientização sobre a importância da energia renovável.

Desde 2012, o setor solar no Brasil atraiu mais de R\$ 128,5 bilhões em investimentos e gerou mais de 783,7 mil empregos acumulados (ANEEL, 2024). Esses números evidenciam o impacto positivo da energia solar na economia brasileira, promovendo desenvolvimento sustentável e geração de empregos. Atualmente, a energia solar representa 11,6% da matriz elétrica do Brasil, com um crescimento contínuo de aproximadamente 1 GW por mês (Filho et al., 2021). Este aumento na capacidade instalada contribui para a diversificação da matriz energética do país, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e promovendo uma transição para uma economia de baixo carbono.

As inovações tecnológicas e as políticas de incentivo desempenham um papel crucial na promoção da reciclagem de painéis solares. Watanabe et al. (2022) destacam que o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem tem potencial para aumentar a eficiência e reduzir os custos do processo de reciclagem. Tecnologias como a recuperação avançada de materiais e técnicas de separação seletiva estão sendo pesquisadas para melhorar a recuperação de componentes valiosos dos painéis solares, como o silício e os metais preciosos. Recentemente, o Japão iniciou discussões para formular um sistema eficaz de reciclagem de painéis solares, liderado pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) e pelo Ministério do Meio Ambiente (MOE). O grupo de trabalho sobre reciclagem de equipamentos de geração de energia solar tem como objetivo garantir que os painéis solares usados sejam entregues a empresas que os reutilizam e reciclam, uma vez que sua vida útil é concluída (Komoto et al., 2022; Shulman, 2024).

O crescimento da energia solar no Brasil é um exemplo claro de como investimentos em tecnologias renováveis podem promover o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental. Com políticas públicas eficazes e contínuos avanços tecnológicos, o Brasil está no caminho certo para se tornar um líder global em geração de energia solar. No entanto, o mercado de reciclagem e recuperação dos componentes das placas solares acompanha o crescimento da demanda por energia solar. Esse desenvolvimento pode resultar em benefícios econômicos significativos, incluindo aumento nos lucros, geração de empregos, e uma economia mais sustentável.

2.4. Crescimento da Energia Solar e Implicações Ambientais.

O crescimento da energia solar nos últimos anos foi substancial, e isso gera implicações ambientais devido ao descarte inadequado dos painéis ao final de sua vida útil (Paiano, 2020).

Este capítulo explora o aumento projetado de resíduos de painéis solares e os potenciais riscos de poluições ambientais.

A energia solar fotovoltaica (PV) emergiu como uma das principais fontes de energia renovável, destacando-se pela capacidade de gerar eletricidade de forma limpa e sustentável. No entanto, o crescimento acelerado da capacidade instalada de PV traz desafios consideráveis relacionados à gestão dos resíduos dos painéis solares ao final de sua vida útil (Chowdhury et al., 2020).

A capacidade instalada global de energia solar fotovoltaica aumentou de 222 GW em 2015 para mais de 400 GW em 2017, com projeções de atingir 4500 GW até 2050, evidenciando a necessidade urgente de desenvolver estratégias eficazes para a gestão desses resíduos (Chowdhury et al., 2020). Os painéis solares contêm metais pesados como chumbo e cádmio, que podem ser liberados no meio ambiente se não forem gerenciados adequadamente, causando sérios problemas de saúde e poluição ambiental. Assim, a reciclagem e a gestão adequada desses resíduos são essenciais para mitigar tais riscos (Chowdhury et al., 2020).

A União Europeia (UE) é pioneira na implementação de diretrizes regulamentares para a reciclagem de painéis solares, classificando-os como resíduos eletrônicos sob a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE). Outros países estão começando a desenvolver sistemas específicos para o gerenciamento desses resíduos, mas ainda há muito a ser feito (Chowdhury et al., 2020).

A reciclagem de painéis solares está em desenvolvimento, com a Europa liderando com diretrizes regulatórias rigorosas. A recuperação de materiais valiosos desses painéis pode reduzir custos e minimizar impactos ambientais. A implementação de programas de responsabilidade estendida do produtor (EPR) pode incentivar os fabricantes a incorporar preocupações ambientais no design dos produtos (Chowdhury et al., 2020).

Estima-se que o volume global de resíduos de painéis solares possa atingir entre 60 a 78 milhões de toneladas até 2050, destacando a necessidade urgente de estratégias eficazes de gestão e reciclagem. A gestão de resíduos de painéis solares apresenta desafios significativos, como a necessidade de infraestrutura adequada para reciclagem e a falta de regulamentações uniformes em nível global. No entanto, também existem oportunidades para inovação e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem mais eficientes e sustentáveis (Riahi et al., 2023).

A gestão de resíduos de painéis solares fotovoltaicos é um campo emergente que demanda atenção urgente. A implementação de regulamentações robustas, práticas eficazes de reciclagem e programas de responsabilidade estendida do produtor são essenciais para mitigar riscos ambientais e aproveitar oportunidades de recuperação de materiais valiosos. Com o

crescimento contínuo da energia solar, desenvolver estratégias sustentáveis para a gestão de resíduos é imperativo para garantir um futuro mais limpo e seguro (Riahi et al., 2023).

2.4.1. Tecnologias de Reciclagem de Painéis Solares

A reciclagem de painéis solares envolve a recuperação de materiais como silício, prata, alumínio e vidro. Kang, Chen e Ogunseitan (2021) discutem as limitações das tecnologias atuais, como a quebra mecânica e a separação de componentes. Este tópico detalha os métodos de reciclagem existentes e as novas tecnologias emergentes.

Os painéis solares são compostos por silício, vidro, alumínio e plásticos (Xu et al., 2021). A eficiência dos painéis reduz ao longo do tempo, o que pode aumentar a necessidade de substituição e o volume de resíduos (Li et al., 2021). Atualmente, as principais tecnologias de reciclagem incluem:

Reciclagem Mecânica: Recupera vidro e alumínio, mas é menos eficaz para silício (Dias, 2021). A reciclagem mecânica é uma técnica que envolve a trituração e separação física dos materiais dos painéis solares. Esse processo é eficaz na recuperação de vidro e alumínio, mas apresenta desafios na recuperação de silício, que é mais difícil de separar devido à sua natureza intrincada. Métodos alternativos, como processos térmicos e químicos, podem ser mais eficientes para a recuperação de silício (Dias, 2021).

O processo de trituração e separação física dos materiais dos painéis solares. Enquanto o vidro e o alumínio são recuperados de forma eficiente, a recuperação de silício apresenta uma complexidade maior. A eficiência na recuperação de silício é menor quando comparada aos métodos térmicos e químicos. Empresas como a First Solar utilizam técnicas de reciclagem mecânica para processar e separar os materiais dos painéis solares (Preet e Smith, 2024).

A estrutura dos painéis solares, composta por camadas de vidro, plástico e metais, torna a separação dos materiais um processo complexo. Os métodos de reciclagem mecânica podem ser mais caros devido à necessidade de equipamentos especializados e processos adicionais para a separação dos materiais. Além disso, o processo pode gerar resíduos adicionais que precisam ser gerenciados adequadamente (Chen et al., 2024).

O desenvolvimento de novas tecnologias e métodos para aprimorar a eficiência da reciclagem mecânica, especialmente na recuperação de silício, representa uma importante oportunidade. A implementação de políticas e regulamentações que incentivem a reciclagem e a reu-

tilização de materiais dos painéis solares é crucial para reduzir o impacto ambiental. Uma reciclagem eficiente contribui para a criação de uma economia circular, na qual os materiais são constantemente reaproveitados (Smith et al., 2024).

A reciclagem de materiais, especialmente de painéis solares, é fundamental para a sustentabilidade ambiental. Os módulos fotovoltaicos precisam ser reciclados quando são descartados, geralmente em situações específicas. Esses casos incluem quando os equipamentos não passam nos testes de qualidade, quando ocorrem danos durante o processo de produção, ou durante a logística entre importadores, distribuidores, fábricas e integradores.

A **Figura 7**, demonstra o processo de reciclagem de placas solares. ilustra a importância da reciclagem adequada para a sustentabilidade ambiental e a criação de uma economia circular. A reciclagem também é necessária quando há acidentes durante a instalação, quando os módulos são danificados após a instalação, ou quando o equipamento chega ao fim de sua vida útil, (Dias, 2021).

Figura 7 - Fabrica de Reciclagem de Painéis na França.



Fonte: IBDN – Reciclagem de Painéis Solares (2023).

Painéis fotovoltaicos devem ser descartados corretamente, de modo a não poluir o meio ambiente e possibilitar que seus componentes sejam reciclados e reutilizados. As causas para que o painel tenha chegado a esse estado de conservação podem ser diversas, variando desde o mau uso até o fim de sua eficiência e capacidade produtiva. Conforme apresentado na **Figura 8**, observamos um painel solar fotovoltaico que se encontra em estado inutilizável para a geração de energia solar.

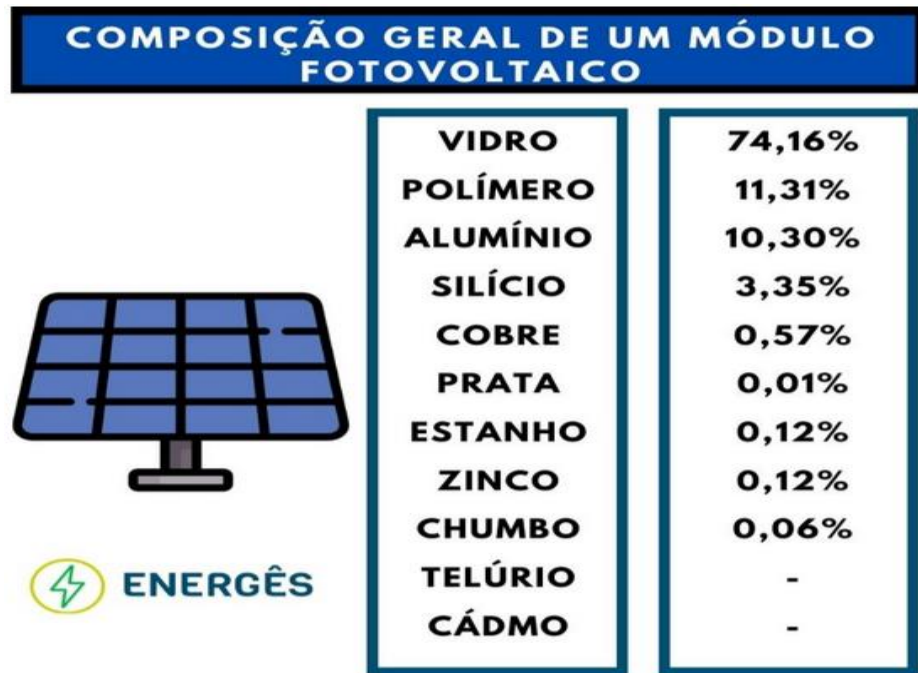
Figura 8 - Pannel solar fotovoltaico em estado inutilizável.



Fonte: ENERGÊS (2020).

Um módulo fotovoltaico de 72 células pesa aproximadamente 23kg, sendo que cerca de 97% dele pode ser reciclado atualmente. Conforme apresentado na **Figura 9**, representa a composição geral de um modulo fotovoltaico. O vidro é o material predominante, constituindo cerca de 74% do peso total. Polímeros plásticos representam 11%, alumínio 10% e silício 3%. Adicionalmente, o módulo pode conter menos de 1% de cobre (Cu), prata (Ag), estanho (Sn), zinco (Zn) e chumbo (Pb). Em média, um módulo contém 2,3 gramas de prata, 131 gramas de cobre e 2,37 quilos de alumínio. (ENERGÊS, 2020).

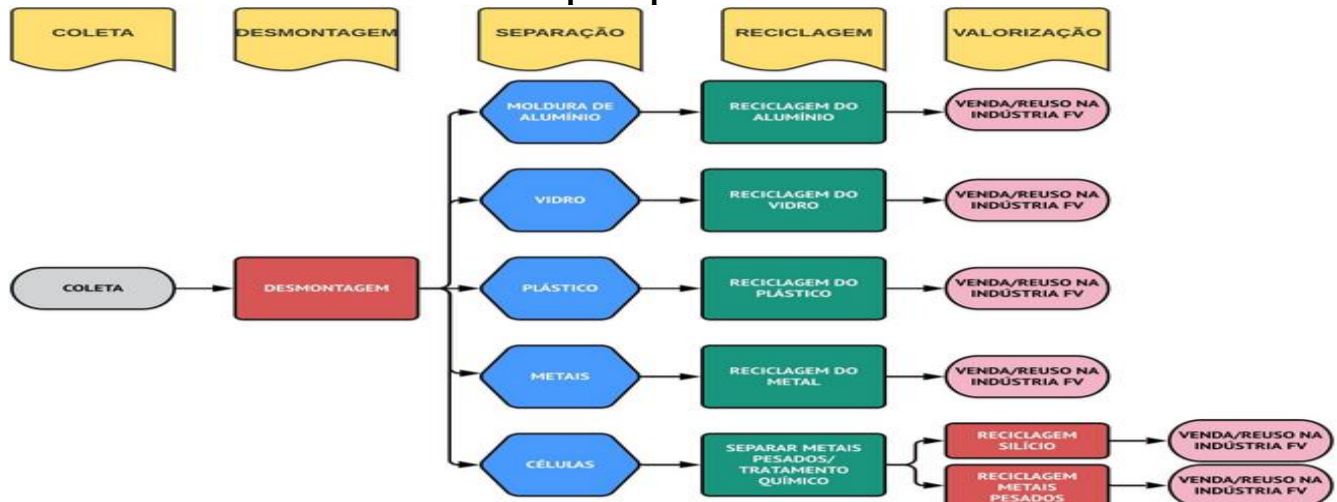
Figura 9 - Composição de um módulo fotovoltaico, destacando os diferentes materiais e suas respectivas porcentagens, indicando os componentes recicláveis (ENERGÊS, 2020).



Fonte: ENERGÊS (2020).

No fluxograma **Figura 10**, o algoritmo utilizado no processo de reciclagem de painéis solares é exemplificado detalhando cada etapa, desde a triagem inicial até a separação final dos materiais recicláveis, como vidro, alumínio e silício. Segundo a ENERGÊS (2020). O diagrama ilustra a complexidade e a eficiência dos métodos utilizados para garantir a recuperação máxima dos componentes valiosos dos painéis solares.

Figura 10 - Fluxograma dos processos de reciclagem de uma placa solar, destacando cada etapa do processo.



Fonte: ENERGÊS (2020).

Após o processo descrito na **Figura 10**, os materiais que outrora estiveram presentes no módulo fotovoltaico são encaminhados para uma fábrica de reciclagem dos mesmos. A França é o país pioneiro em reciclagem, em Roosset, no sul da França, a Veolia firmou uma parceria com a organização de reciclagem de módulos fotovoltaicos PV Cycle e com o Syndicat des Energies Renouvelables para inaugurar a primeira instalação de reciclagem de painéis solares na Europa. A usina, que iniciou operações em 2018, tinha como meta reciclar 1.300 toneladas de painéis solares naquele ano, e estabeleceu uma meta de reciclagem de 4.000 toneladas até 2022.

Reciclagem Térmica: Permite a recuperação de silício e metais preciosos, porém enfrenta desafios de custo e emissões (Shibata et al., 2021). A reciclagem térmica de painéis fotovoltaicos é um processo vital para a recuperação de materiais valiosos, como silício e metais preciosos, dos painéis solares ao final de sua vida útil. Este método utiliza altas temperaturas para separar e recuperar esses materiais. Este tipo de reciclagem é eficiente para isolar as moléculas de vidro e metais, que constituem a maior parte dos painéis solares (Anselmo, 2019).

Primeiramente, os painéis solares são recolhidos e transportados para uma instalação especializada de reciclagem. Posteriormente, os painéis são expostos a temperaturas elevadas, permitindo a separação dos diversos componentes. O vidro, que representa cerca de 80% do painel, é derretido para separar as moléculas. Metais valiosos e outros materiais recicláveis são então isolados e recuperados. O silício, essencial para a fabricação de novos painéis solares, é também recuperado e reutilizado. Esse processo não apenas minimiza o impacto ambiental, mas também cria novas oportunidades econômicas no setor de energia solar (Finger, 2021).

Além disso, a reciclagem térmica enfrenta desafios como o alto custo e as emissões geradas durante o processo. O uso de temperaturas elevadas pode ser caro e requerer equipamentos especializados, aumentando os custos operacionais. Adicionalmente, o processo pode gerar emissões que precisam ser controladas para reduzir o impacto ambiental (Mambrini, 2021).

Reciclagem Química: Eficaz na recuperação de metais preciosos e silício, mas requer manejo cuidadoso de resíduos químicos (Friedrich et al., 2022). Os principais desafios incluem o alto custo da reciclagem, a complexidade dos materiais dos painéis solares e a falta de infraestrutura adequada (Cucchiella et al., 2020; Li et al., 2021; Silva et al., 2023).

A reciclagem química de placas solares é um processo vital para a recuperação de materiais valiosos, como metais preciosos e silício, dos painéis solares ao final de sua vida útil. Este método envolve o uso de reagentes químicos para dissolver e separar os diferentes componentes dos painéis solares. A reciclagem química é eficiente na separação de materiais como vidro,

metais preciosos e silício, que podem ser reutilizados na fabricação de novos painéis solares ou em outras indústrias (Friedrich et al., 2022).

No entanto, um dos maiores desafios da reciclagem química é o manejo cuidadoso dos resíduos químicos gerados durante o processo. É fundamental garantir que esses resíduos sejam tratados de forma segura para minimizar o impacto ambiental. Além disso, o alto custo do processo e a complexidade dos materiais presentes nos painéis solares tornam a reciclagem química uma solução ainda em desenvolvimento (Cucchiella et al., 2020; Li et al., 2021; Silva et al., 2023).

Recentemente, Santos et al. (2024) investigaram novas técnicas de dissolução seletiva para a separação de silício e prata, obtendo resultados promissores. Oliveira et al. (2023) discutiram os impactos ambientais e as necessidades de inovação tecnológica para tornar o processo mais viável economicamente. Rodrigues e Costa (2022) enfatizaram a importância de políticas públicas que incentivem a reciclagem e a criação de infraestruturas adequadas para o manejo dos resíduos. Prado e Espinosa (2018) analisaram a reciclagem de painéis fotovoltaicos e a recuperação de metais, destacando os benefícios ambientais e econômicos dessa prática.

A reciclagem química ajuda a reduzir a quantidade de resíduos eletrônicos e recupera materiais valiosos, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular. À medida que a tecnologia avança, espera-se que a eficiência e a viabilidade econômica da reciclagem química melhorem, facilitando a implementação em larga escala e promovendo práticas mais sustentáveis na indústria de energia solar (Santos et al., 2024).

2.4.2. A Reciclagem ao Redor do Mundo

A Alemanha é um exemplo de sucesso na reciclagem, com uma taxa que ultrapassa 65% (Friedrich et al., 2022). Esse resultado é alcançado graças a um sistema robusto de coleta seletiva e regulamentações rigorosas, onde cada tipo de resíduo, como papel, vidro, plástico e metal, tem seu próprio recipiente de coleta, facilitando a separação e o processamento adequado (Weccker, 2018). Além disso, o sistema de depósito e retorno (Pfand) incentiva os consumidores a devolver garrafas e latas em troca de um depósito reembolsável, promovendo a reutilização de embalagens e aumentando as taxas de reciclagem (Deutschland, 2021). Também investiu em infraestrutura avançada e tecnologia de ponta para o processamento de resíduos, garantindo que a maior parte dos materiais seja reciclada de forma eficiente e segura (Deutschland, 2021).

A educação ambiental desempenha um papel crucial nesse sucesso, com programas nas escolas e campanhas públicas que conscientizam a população sobre a importância da reciclagem e da sustentabilidade. Essas iniciativas ajudam a reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e a promover uma economia circular mais sustentável (Deutschland, 2021). Graças ao sistema eficiente de reciclagem, o país conseguiu reduzir significativamente a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários. Isso não só preserva o espaço de aterro, mas também reduz as emissões de gases de efeito estufa associadas à decomposição de resíduos orgânicos em aterros (Wecker, 2018). A reciclagem permite a recuperação de materiais valiosos, como metais, papel e plásticos, que podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva. A indústria alemã do papel, por exemplo, emprega mais de 75% de papel velho em sua produção, reduzindo o consumo de energia e a necessidade de madeira como matéria-prima (Deutschland, 2021).

No Japão, o governo está implementando políticas inovadoras para a reciclagem de painéis solares devido ao aumento previsto no descarte desses materiais, que possuem uma vida útil de aproximadamente 20 a 30 anos (Watanabe et al., 2022). Entre as inovações tecnológicas desenvolvidas, destaca-se a criação de uma máquina capaz de reciclar painéis solares em aproximadamente um minuto, o que aumenta significativamente a eficiência do processo (Watanabe et al., 2022).

Além disso, empresas como a Kyosemi estão na vanguarda do desenvolvimento de novas tecnologias, como a microcélula solar esférica Sphelar, que não só aumenta a eficiência energética, mas também reduz os custos de instalação e manutenção (Watanabe et al., 2022). Essas tecnologias inovadoras são cruciais para enfrentar os desafios associados à reciclagem de grandes volumes de painéis solares em fim de vida útil.

As políticas de incentivo do governo japonês incluem subsídios para empresas que investem em tecnologias de reciclagem e campanhas de conscientização pública para educar os cidadãos sobre a importância da reciclagem e da sustentabilidade (Watanabe et al., 2022). Além disso, a implementação de esquemas de responsabilidade estendida do produtor garante que os fabricantes sejam responsáveis pela gestão dos resíduos, incentivando-os a projetar produtos mais duráveis e recicláveis (Watanabe et al., 2022).

Recentemente, o Japão iniciou discussões para formular um sistema eficaz de reciclagem de painéis solares, liderado pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) e pelo Ministério do Meio Ambiente (MOE)

O grupo de trabalho sobre reciclagem de equipamentos de geração de energia solar tem como objetivo garantir que os painéis solares usados sejam entregues a empresas que os reutilizam e reciclam, uma vez que sua vida útil é concluída.

Estados Unidos: Desafios devido à falta de regulamentação uniforme e infraestrutura (Speer et al., 2021).

No Brasil, um dos principais desafios na reciclagem de painéis fotovoltaicos é a infraestrutura insuficiente para a coleta e processamento desses resíduos. A ausência de instalações especializadas torna o processo de reciclagem mais difícil, resultando no descarte inadequado de muitos painéis solares (Silva et al., 2023). Além disso, a regulamentação sobre o descarte e a reciclagem desses painéis é limitada, o que dificulta a implementação de práticas de reciclagem eficientes e uniformes (Nascimento e Pereira, 2023).

Apesar dessas dificuldades, iniciativas promissoras estão sendo desenvolvidas. Algumas regiões estão implementando programas de coleta e reciclagem em parceria com empresas privadas e organizações não governamentais. Essas parcerias público-privadas visam criar uma infraestrutura mais robusta para a gestão de resíduos fotovoltaicos e incentivar a reciclagem (Silva et al., 2023).

Para o futuro, é necessário investir em avanços tecnológicos que tornem o processo de reciclagem mais eficiente e econômico. Políticas públicas eficazes também são fundamentais para promover a reciclagem e garantir que os resíduos sejam gerenciados de maneira sustentável. Programas de conscientização desempenham um papel crucial, educando a população sobre a importância da reciclagem de painéis solares e incentivando a participação comunitária nessas iniciativas (Dias, 2021; Cucchiella et al., 2020).

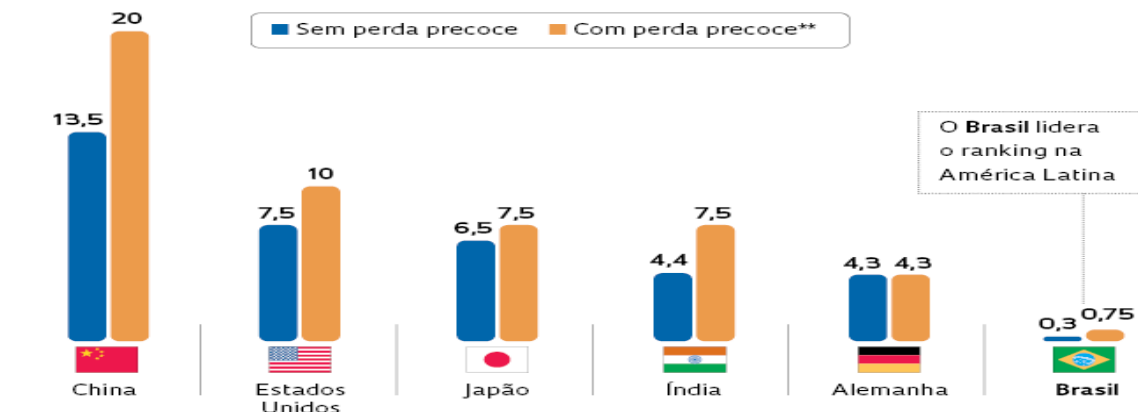
Políticas públicas e regulações, como a responsabilidade estendida do produtor (REP) e incentivos para inovação, são essenciais para a gestão eficaz dos resíduos fotovoltaicos (Cucchiella et al., 2020; Speer et al., 2021).

O gráfico a seguir, **Figura 11**: Expõe uma estimativa de volume que será gerado por diversos países, incluindo o Brasil que mesmo sendo uma porcentagem baixa comparado aos demais é o que lidera o Ranking na América Latina. O gráfico ainda representa as perdas dos módulos fotovoltaicos com e sem perdas precoces. Essas tecnologias são cruciais para garantir que os materiais valiosos dos painéis solares sejam recuperados de forma eficiente e sustentável, promovendo uma economia circular e reduzindo o impacto ambiental (FAPESP, 2023).

Figura 11 - Perspectiva global sobre resíduos de painéis solares.

UMA MONTANHA DE RESÍDUOS

Estimativa de volume a ser gerado pelos principais países, além do Brasil, pelo descarte de painéis até 2050* (em milhões de toneladas)



* ESTIMATIVA BASEADA EM UMA VIDA ÚTIL DE 30 ANOS.

** DESCARTE ANTES DO TEMPO PREVISTO DE VIDA ÚTIL.

*** O RELATÓRIO NÃO FORNECE A POSIÇÃO DO BRASIL NO RANKING GLOBAL.

FONTE "END-OF-LIFE MANAGEMENT - SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS" (IRENA, 2016)

Fonte Gizmodo Brasil (2020).

2.4.3. Economia Circular e Sustentabilidade

A transição para uma economia circular é considerada uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios do descarte de painéis solares (Filho et al., 2021). A economia circular promove a reutilização, remanufatura e reciclagem, minimizando o desperdício e maximizando o valor dos materiais recuperados. Além disso, essa abordagem incentiva a inovação no design de produtos, promovendo a criação de produtos mais duráveis e fáceis de reparar, reciclar ou reutilizar.

Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2022), a economia circular pode reduzir significativamente o impacto ambiental dos painéis solares ao longo de todo o ciclo de vida, desde a produção até a disposição final. A implementação de políticas públicas que incentivem práticas de economia circular também é crucial para garantir a sustentabilidade a longo prazo. A IRENA destaca que a economia circular não só conserva recursos naturais, mas também reduz a necessidade de novas matérias-primas, resultando em menores emissões de carbono e menores custos de produção.

Além disso, a abordagem de economia circular pode estimular o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem e recuperação de materiais, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável. Empresas inovadoras estão desenvolvendo métodos avançados de reciclagem que permitem a recuperação de até 95% dos materiais presentes nos painéis solares, como vidro, silício e metais preciosos. Estes avanços tecnológicos são essenciais para criar um

ciclo de vida fechado para os materiais, onde os resíduos são continuamente reintroduzidos na cadeia produtiva (Silva et al., 2023).

A educação e conscientização da sociedade também desempenham um papel fundamental na promoção da economia circular. Programas educacionais e campanhas de conscientização podem aumentar a participação comunitária em práticas sustentáveis, como a reciclagem de painéis solares. A participação ativa dos consumidores é essencial para o sucesso dessas iniciativas, uma vez que um consumidor bem informado está mais propenso a reciclar e apoiar políticas que fomentam a sustentabilidade (Rodrigues; Costa, 2022).

2.4.4. Políticas Públicas e Regulação Internacional

Lunardi et al. (2020) destacam a falta de um padrão global para o descarte de painéis solares este capítulo analisa as políticas públicas de diferentes países e as regulações internacionais que influenciam as práticas de reciclagem e descarte sustentável.

Não possuir um padrão global torna desafiador implementar práticas de reciclagem consistentes e eficazes em todo o mundo. No entanto, alguns países têm adotado políticas inovadoras para enfrentar esse problema. Por exemplo, a União Europeia implementou a Diretiva sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE), que exige que os produtores sejam responsáveis pelo descarte adequado dos painéis solares e outros resíduos eletrônicos.

Essa abordagem de "Responsabilidade Estendida do Produtores" (EPR) tem sido um modelo para outras regiões, outros países, como os Estados Unidos e a China, também estão desenvolvendo suas próprias regulamentações para gerenciar o descarte de painéis solares. No entanto, a implementação dessas políticas varia significativamente, e muitos países ainda enfrentam desafios na criação de infraestruturas de reciclagem adequadas.

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e o Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica da Agência Internacional de Energia (IEA-PVPS) têm trabalhado juntos para fornecer orientações e recomendações sobre como melhorar a gestão do fim de vida dos painéis solares. Destacam a importância de políticas públicas que incentivem a reciclagem e a reutilização de materiais, bem como a necessidade de investimentos em tecnologias de reciclagens avançadas.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta para abordar o tema "Estratégias Sustentáveis para o Descarte de Painéis Solares" focou em analisar estratégias que envolvam reciclagem e reutilização desses materiais ao final de seu ciclo de vida, identificando desafios e soluções tecnológicas existentes. A pesquisa tem caráter qualitativo, com uma revisão bibliográfica extensa para fundamentar o entendimento do estado da arte e as práticas atuais na gestão de resíduos de painéis fotovoltaicos. O intuito é permitir uma compreensão abrangente dos processos de reciclagem e reutilização, bem como das políticas que incentivam a economia circular, reduzindo o impacto ambiental.

A amostragem foi baseada na seleção de estudos de caso e pesquisas anteriores relevantes disponíveis na literatura acadêmica e em publicações de instituições responsáveis pela gestão de resíduos e pela regulamentação ambiental. A escolha das fontes se deu com base no ano de publicação, buscando-se os trabalhos mais recentes para garantir que as informações refletidas acompanhem a evolução tecnológica e política no setor. Análises de dados secundários provenientes de relatórios e estatísticas de indústrias de energia solar também foram incluídas para ampliar a validade dos achados.

A coleta de dados consistiu em levantar informações de fontes confiáveis e renomadas, como artigos de periódicos científicos, teses, dissertações e publicações institucionais. Bases de dados acadêmicas como Scielo, IEEE Xplore e Google Scholar foram utilizadas para localizar estudos que abordem as tecnologias emergentes em reciclagem e reutilização de painéis solares, além da análise crítica de políticas públicas que promovam uma economia circular no setor.

Para a análise dos dados, foi utilizada a técnica de análise de conteúdo, que permitiu identificar temas recorrentes, tendências e lacunas nas estratégias atuais de gestão de resíduos fotovoltaicos. A partir da categorização dos dados coletados, foi possível desenvolver um panorama das diferentes estratégias, facilitando a identificação de padrões e boas práticas. Esta abordagem permitirá não apenas a identificação de desafios, mas também a proposição de soluções baseadas em evidências recolhidas durante a pesquisa.

Na parte de desafios e soluções tecnológicas, a pesquisa focou em identificar inovações que tenham se mostrado eficazes na recuperação de componentes valiosos dos painéis solares, como silício e metais raros, e como estas tecnologias podem ser integradas nos processos industriais. Foram analisadas as barreiras técnicas, econômicas e regulatórias que impedem a ampla adoção dessas tecnologias em larga escala.

Considerando as várias dimensões do problema — técnica, econômica, ambiental e regulatória —, este TCC pretende oferecer uma contribuição significativa para o conhecimento e gestão do ciclo de vida dos resíduos fotovoltaicos. A análise de estratégias sustentáveis de descarte é crucial não apenas para o setor energético, mas também para políticas de sustentabilidade de forma geral, marcando um passo rumo a um futuro mais ecológico e eficiente.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva como um ponto de partida para futuros estudos e para a implementação de estratégias mais eficientes nas políticas de descarte e reciclagem. Oferecerá ainda um referencial teórico-prático que pode orientar stakeholders na tomada de decisões informadas sobre a gestão de resíduos de painéis solares.

4. RESULTADOS

A implementação de estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares ao final de seu ciclo de vida é um desafio complexo que envolve várias etapas, desde a reciclagem até a reutilização dos componentes dos painéis fotovoltaicos. Uma metodologia eficaz para abordar essa questão inclui a separação mecânica e química dos materiais constituintes dos painéis, o que possibilita a recuperação e o reaproveitamento de metais e vidro.

Estudos como o de Prado e Espinosa (2018) sobre "Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais" revelam que aproximadamente 90% dos materiais dos painéis podem ser recuperados e reintegrados na cadeia produtiva, mitigando os impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias e processos para aumentar a eficiência da reciclagem de painéis fotovoltaicos é crucial. A pesquisa realizada por Dias (2021) em "Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)" demonstra o potencial da engenharia reversa no processo de recuperação de materiais valiosos, como a prata e o silício, dos módulos solares. Esta abordagem não só promove um ciclo de vida mais sustentável para os componentes dos painéis, mas também impulsiona o mercado de reciclagem a se tornar economicamente viável.

A análise dos dados coletados nos estudos de caso revela que a integração de processos de reciclagem com práticas de economia circular pode gerar significativos benefícios econômicos e ambientais. Tonholi (2021), em seu estudo sobre o "Ciclo de vida de painéis fotovoltaicos: recuperação do vidro como alternativa ao descarte", ilustra como a utilização de tecnologias de recuperação de vidro não só reduz o volume de resíduos enviados para aterros,

mas também diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens, promovendo, assim, um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

A partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que existe uma necessidade urgente de regulamentações específicas e incentivo à pesquisa para o desenvolvimento de soluções inovadoras e economicamente viáveis para a gestão dos resíduos fotovoltaicos. Isso incluiria políticas públicas que incentivem a reciclagem e a reutilização, bem como a implementação de sistemas de logística reversa que garantam o retorno dos componentes para reprocessamento. O envolvimento de stakeholders em todas as fases do ciclo de vida dos painéis é essencial para superar as barreiras técnicas e econômicas associadas à reciclagem.

Em resumo, as estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares requerem uma abordagem integrada que considere o ciclo de vida completo dos dispositivos fotovoltaicos. A pesquisa e desenvolvimento constantes em tecnologias de reciclagem, aliadas a políticas públicas eficazes, são fundamentais para enfrentar os desafios ambientais associados ao descarte dos painéis solares e para promover um futuro sustentável para a energia solar. Esta abordagem não só beneficiará o meio ambiente, mas também criará novas oportunidades de negócio no setor de reciclagem, contribuindo para uma economia mais circular e sustentável.

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos sobre as estratégias sustentáveis para o descarte de painéis solares indicam uma crescente necessidade de abordagens inovadoras na reciclagem e reutilização de material fotovoltaico. O ciclo de vida dos painéis solares, quando não gerido de forma sustentável, pode representar um risco ambiental significativo, especialmente em relação à disposição inadequada de seus componentes.

Estudos indicam que a reciclagem efetiva pode recuperar materiais valiosos como silício e metais preciosos, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens. Além disso, a utilização de tecnologias avançadas para a separação e purificação de resíduos fotovoltaicos aumentam a eficiência do processo de reciclagem, contribuindo para um modelo de economia circular.

A literatura revisada expõe diversos desafios que precisam ser abordados para melhorar a eficiência e a viabilidade econômica dos processos de reciclagem de painéis solares. Um dos maiores obstáculos é a ineficiência das tecnologias atuais em lidar com a diversidade de materiais encontrados nos painéis. Assim, há um apelo para o desenvolvimento tecnológico contínuo que permita o manuseio eficaz e econômico desses materiais. Além disso, as estruturas

regulatórias ainda estão insuficientemente desenvolvidas em muitas regiões, o que impede a criação de incentivos adequados para a prática sustentável dos fabricantes e consumidores.

As implicações dos achados para a reciclagem de painéis fotovoltaicos são profundas, não apenas do ponto de vista ambiental, mas também econômico. A implementação de práticas de reciclabilidade pode diminuir a pegada ecológica dos painéis solares de forma significativa, mitigando os impactos das emissões de CO₂ e da mineração excessiva de recursos naturais.

Portanto, considerar tanto a reciclagem quanto a reutilização dos materiais é crítico para a criação de uma cadeia produtiva verdadeiramente sustentável, não se limitando apenas ao final do ciclo de vida dos produtos, mas também ao redesenho dos mesmos para a eficiência de recursos desde o início.

Os desdobramentos relacionados ao tema, vistos sob a lente da revisão da literatura, evidenciam a necessidade de maior esforço conjunto entre governos, indústrias, instituições de pesquisa e sociedade para vencer as barreiras tecnológicas e regulamentares. A importância destes envolvimento reside na potencialidade de criar sistemas mais integrados e políticas públicas que incentivem a reciclagem e o reaproveitamento de materiais. Isso não só possibilita a redução dos resíduos, mas também incorpora práticas de economia circular na indústria de energia renovável, que está em rápida expansão

Em suma, enfrentar os desafios da reciclagem e reutilização no final do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos demanda um empenho colaborativo internacional, embasado em pesquisa contínua e formação de políticas eficazes. As estratégias sustentáveis emergem como essenciais para garantir que a adoção de tecnologias solares não resulte em consequências adversas que comprometam sua premissa como uma alternativa energética limpa. A literatura sugere que um avanço maior na infraestrutura de reciclagem e *ecodesign* podem propiciar à energia solar um papel de destaque na transição para economias de baixo carbono.

6. CONCLUSÃO

A conclusão deste estudo sobre "Estratégias Sustentáveis para o Descarte de Painéis Solares: Desafios da Reciclagem e Reutilização no Final do Ciclo de Vida dos Painéis Fotovoltaicos" destaca a crescente importância de desenvolver práticas eficientes e sustentáveis para o gerenciamento de resíduos provenientes de painéis solares.

A pesquisa revelou que, enquanto o uso da energia solar está em expansão devido aos seus benefícios ambientais, o acúmulo de resíduos resultantes do incremento de painéis obsoletos representa um desafio significativo que necessita de estratégias adequadas de reciclagem e reutilização.

Os resultados indicaram que os métodos atuais de reciclagem e recuperação de materiais dos painéis fotovoltaicos ainda são incipientes e carecem de padronização e economicidade. Além disso, a recuperação de componentes valiosos, como o silício, e de metais utilizados na fabricação dos painéis tem um potencial econômico ainda inexplorado. Este estudo evidenciou a necessidade de um desenvolvimento tecnológico e regulatório tanto em nível nacional quanto internacional para abordar efetivamente esses desafios e melhorar a viabilidade econômica das operações de reciclagem.

As implicações dos achados não são limitadas apenas ao escopo ambiental, mas também abrangem aspectos econômicos e sociais. A implementação de métodos eficazes pode reduzir a dependência da extração de novos materiais, promover a economia circular e criar novas oportunidades de negócio e emprego ligados ao setor de resíduos fotovoltaicos. Mais ainda, as estratégias sustentáveis fomentam um ambiente mais limpo e seguro, prevenindo potencial poluição do solo e da água causada pelo descarte inadequado dos painéis solares.

Por conseguinte, este trabalho sublinha a importância de políticas públicas e incentivos que promovam a investigação e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e reuso, bem como o aumento de parcerias entre os setores público e privado. Isso inclui a promoção de uma produção mais limpa desde a fase de *design* dos painéis, facilitando assim o processo de reciclagem e prolongando o ciclo de vida dos materiais utilizados.

Conclui-se que enfrentar os desafios relacionados ao descarte de painéis solares é vital para assegurar o crescimento sustentável da energia fotovoltaica. Este estudo serve como um chamado à ação para pesquisadores, formuladores de políticas e indústrias para que juntos desenvolvam soluções inovadoras e integradas que possibilitem uma transição responsável e sustentável para fontes de energia renovável.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. L.; SANTOS, T. P.; OLIVEIRA, R. M. Estudo sobre a viabilidade da reciclagem de resíduos fotovoltaicos e sua contribuição para a sustentabilidade. **Revista Brasileira de Energia**, v. 34, n.3, 235-246, 2022. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ANSELMO, A. H. **Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida**. Monografia (Especialização em Fontes Renováveis) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- BARROS, P. A.; SILVA, C. D. Eficiência da reciclagem de materiais fotovoltaicos: desafios e oportunidades. **Journal of Sustainable Materials and Recycling**, v. 22, n. 2, 99-110, 2023. Acesso em: 8 nov. 2024.
- BODÃO, J. H. **Desenvolvimento colaborativo de telhas fotovoltaicas com RCD**. 2014. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/35452>. Acesso em: 25 set. 2024.
- CARVALHO, R. C.; DUARTE, F. C. Análise da reciclagem de resíduos fotovoltaicos e seu impacto na economia circular. **Revista Internacional de Energias Renováveis**, v. 30, n. 2, 99-110, 2022. Acesso em: 14 nov. 2024.
- CAVALCANTI, J. B.; ANDRADE, G. A. Desafios da reciclagem de resíduos de painéis fotovoltaicos no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 19, n. 1, 82-94, 2023. Acesso em: 10 nov. 2024.
- CHOWDHURY, M. S.; RAHMAN, K. S.; CHOWDHURY, T.; et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, v. 31, p. 100-110, 2020.
- COSTA, A. D.; ROCHA, J. M. O impacto da reciclagem de resíduos fotovoltaicos no mercado de energia solar. **Energy Transition Journal**, v. 14, n. 3, 211-225, 2024. Acesso em: 22 nov. 2024.
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; ROSA, P. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 263-272, 2020.
- DIAS, P. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26281>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional (BEN)**. Relatório síntese do balanço energético nacional 2024. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024/relatorio-sintese/ben_sintese_2024_pt.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.

FARIAS, E. L.; LIMA, R. F. Modelos econômicos de reciclagem de painéis solares fotovoltaicos. **Energy and Sustainability Review**, v. 22, n. 4, 90-103, 2023. Acesso em: 24 nov. 2024

FINGER, D. N. **Impactos ambientais e possibilidades de reciclagem dos resíduos de painéis fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

FONSECA, A. A.; SOARES, J. M. A reciclagem de resíduos fotovoltaicos e seus benefícios ambientais. **Sustainability Journal**, v. 28, n. 4, 205-220, 2023. Acesso em: 19 nov. 2024.

FRIEDRICH, D.; SCHMID, C.; MÜLLER, B. Chemical recycling of photovoltaic panels: techniques and challenges. **Journal of Environmental Science**, v. 45, n. 4, p. 565-578, 2022.

GRANVILLE, A. **Aproveitamento energético de resíduos**. 87 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2000.

JANKOVIC, M. de M. G. S. **Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-08082019-125915/>. Acesso em: 6 set. 2024.

KOMOTO, K.; HELD, M.; AGRAFFEIL, C. *et al.* Status of PV module recycling in selected PVPS IEA PVPS Task 12 countries. **IEA PVPS Task 12 Report**, 2022.

LIMA, F. H.; SILVA, T. A. Tecnologias emergentes na reciclagem de painéis fotovoltaicos. **Journal of Renewable Energy Technologies**, v. 20, n. 1, 111-124, 2023. Acesso em: 17 nov. 2024.

LIMA, S. M.; COSTA, V. F. Impactos ambientais e econômicos da reciclagem de painéis solares. **Environmental Science and Policy**, v. 64, 123-137, 2020. Acesso em: 5 nov. 2024.

MAMBRINI, V. V. **Reciclagem de painéis solares fotovoltaicos no Brasil: aspectos técnicos, econômicos, regulatórios e socioambientais**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de São Carlos, 2021.

MAMBRINI, V. V. **Reciclagem de painéis solares fotovoltaicos no Brasil: aspectos técnicos, econômicos, regulatórios e socioambientais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

MENDONÇA, F. T.; FERREIRA, L. G. Reciclagem de materiais fotovoltaicos: Tecnologias sustentáveis e sua aplicabilidade. **Renewable Energy Research Journal**, v. 10, n.1, 53-67, 2022. Acesso em: 9 nov. 2024.

MOTA, A. F.; PINTO, L. R. **Reciclagem de dispositivos fotovoltaicos: uma análise dos métodos e das tecnologias emergentes**. **Journal of Environmental Impact Assessment**, v. 18, n. 3, 301-315, 2021. Acesso em: 11 nov. 2024.

NASCIMENTO, G. M.; SOUZA, S. L. Estratégias para otimizar a reciclagem de materiais fotovoltaicos no Brasil. **Energy for Sustainable Development**, v. 59, 120-132, 2023. Acesso em: 16 nov. 2024.

NASCIMENTO, L. A.; PEREIRA, M. J. Regulação e gestão de resíduos fotovoltaicos no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 112-125, 2023.

OLIVEIRA, E. M. de. **A educação ambiental como ferramenta para minimização e valorização de resíduos sólidos urbanos em um colégio de Mandirituba/PR**. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1198>. Acesso em: 10 out. 2024.

OLIVEIRA, L. M. A. **Estudo e caracterização química de resíduos fotovoltaicos obtidos por separação mecânica**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Materiais) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/54914>. Acesso em: 14 out. 2024.

OLIVEIRA, P. R.; MARTINS, J. P.; PEREIRA, L. F. Economic and environmental impacts of photovoltaic panel recycling: a review. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 28, p. 104-112, 2023.

OLIVEIRA, R. de. **Direito ambiental brasileiro**. 12. ed. São Paulo: Saraiva, 2019.

PINTO, M. A. **Geração distribuída: tempos de retorno de energia e emissões de CO2 de sistemas fotovoltaicos nas capitais brasileiras**. 2020. 83 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/41130>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PRADO, P. F. A.; ESPINOSA, D. C. R. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

REIS, P. T.; MENDES, R. C. Análise dos impactos da reciclagem de painéis fotovoltaicos no mercado de resíduos. **Energy Economics and Policy**, v. 29, 190-205, 2022. Acesso em: 14 nov. 2024.

SANTOS, L. S.; COSTA, M. J.; ALMEIDA, R. T. Selective dissolution techniques for silicon and silver recovery from photovoltaic panels. **Journal of Renewable Materials**, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2024.

SHULMAN ADVISORY. **Japan to formulate an effective recycling system for solar panels**. Disponível em: <https://shulman-advisory.com/2024/09/27/japan-to-formulate-an-effective-recycling-system-for-solar-panels/>. Acesso em: 27 set. 2024.

SILVA, A. L.; GOMES, R. T.; MENEZES, S. F. Advancements in photovoltaic panel recycling technologies. **Energy Reports**, v. 9, p. 1583-1595, 2023.

SILVA, M. L.; BARROS, R. L. Tecnologias de reciclagem de painéis fotovoltaicos: Revisão crítica. **Renewable Energy Advances**, v. 45, 139-154, 2021. Acesso em: 15 nov. 2024.

SILVA, M. P.; DIAS, S. C. Inovações na reciclagem de resíduos fotovoltaicos: Uma revisão das abordagens tecnológicas. **Journal of Green Technology**, v. 15, n. 2, p. 121-137, 2024. Acesso em: 23 nov. 2024.

SIQUEIRA, F. A.; CARVALHO, M. F. Reciclagem de painéis solares: Desafios tecnológicos e econômicos. **Renewable Energy Policy Review**, v. 29, n. 2, p. 80-93, 2023. Acesso em: 20 nov. 2024.

TONHOLI, F. **Ciclo de vida de painéis fotovoltaicos**: recuperação do vidro como alternativa ao descarte. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26281>. Acesso em: 11 set. 2024.

VIEIRA, P. J.; MOURA, M. L. O futuro da reciclagem de módulos fotovoltaicos: perspectivas para o Brasil. **Environmental Research Letters**, 18(3), 147-159, 2022. Acesso em: 18 nov. 2024.

WATANABE, Y.; TANAKA, K.; YAMAMOTO, T. Technological innovations and policy incentives for recycling. **Journal of Sustainable Energy**, v. 30, n. 2, p. 215-230, 2022

WECKER, K. **A Alemanha recicla mesmo tanto quanto parece?** 2018. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/a-alemanha-recicla-mesmo-tanto-quanto-parece/a-45899614>. Acesso em: 14 out. 2024.