

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Rafael Rodrigues Machado Miranda Cardoso

**Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos: Análise do Mercado, Viabilidade
Econômica e Cenário Político**

São Paulo
2024

RAFAEL RODRIGUES MACHADO MIRANDA CARDOSO

Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos: Análise do Mercado, Viabilidade Econômica e
Cenário Político

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar Fotovoltaica

Orientador: Professor Ph.D. José Aquiles B. Grimoni.

São Paulo

2024

RESUMO

Em uma reação imediata à procura por fontes de energia mais sustentáveis nos últimos anos, a produção de energia solar fotovoltaica tem aumentado exponencialmente tanto no Brasil quanto globalmente. No entanto, com a expansão do uso de módulos fotovoltaicos, surge a questão de como administrar os resíduos durante a vida útil desses aparelhos. A quantidade de módulos fotovoltaicos descartados deve crescer consideravelmente nas próximas décadas, tornando a reciclagem uma questão de grande relevância tanto econômica quanto ambiental. Portanto, para assegurar a viabilidade do setor solar a longo prazo, é crucial compreender a situação presente da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil. O propósito deste estudo é examinar a viabilidade econômica, o avanço do mercado de reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, além dos impactos do contexto político neste mercado em ascensão. O estudo tem como objetivo analisar a influência das políticas governamentais no incentivo a práticas mais sustentáveis, além de analisar a infraestrutura necessária para tal processo, além de analisar os obstáculos e as possibilidades que surgem com o progresso da coleta seletiva. A expectativa é proporcionar uma visão completa das oportunidades e desafios associados à reciclagem de módulos fotovoltaicos no país, unindo uma análise de mercado a uma avaliação das tendências políticas e econômicas.

Palavras chave: Energia solar fotovoltaica. Resíduos fotovoltaicos. Logística reversa. Economia circular. Regulação do descarte.

ABSTRACT

In an immediate reaction to the demand for more sustainable energy sources in recent years, the production of photovoltaic solar energy has increased exponentially both in Brazil and globally. However, as the use of photovoltaic modules expands, the question arises of how to manage waste during the lifetime of these devices. The amount of discarded photovoltaic modules is expected to grow considerably over the next few decades, making recycling an issue of great economic and environmental relevance. Therefore, in order to ensure the long-term viability of the solar sector, it is crucial to understand the current situation of photovoltaic module recycling in Brazil. The purpose of this study is to examine the economic viability and progress of the photovoltaic module recycling market in Brazil, as well as the impact of the political context on this growing market. The study aims to analyze the influence of government policies in encouraging more sustainable practices, as well as analyzing the infrastructure needed for this process, and analyzing the obstacles and possibilities that arise with the progress of selective collection. The expectation is to provide a complete overview of the opportunities and challenges associated with the recycling of photovoltaic modules in the country, combining a market analysis with an assessment of political and economic trends.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Photovoltaic waste. Reverse logistics. Circular economy. Disposal regulation.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

c-Si	Silício Cristalino
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Seleneto de Cobre Índio Gálio
CO ₂	Dióxido de Carbono
DSSC	Células Solares Sensibilizadas por Corantes
EVA	Acetato de Vinil Etileno
GWh/ano	Gigawatts Hora por Ano
GWp	Gigawatts Pico
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRENA	International Renewable Energy Agency
MWp	Megawatts Pico
PL	Projeto de Lei
PV	Fotovoltaico
SSTD	Tratamento Térmico Seco e Molhado
TPT	Tedlar/PET/Tedlar
USD	Dólares americanos
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment (Equipamentos Elétricos e Eletrônicos)
Wh/m ²	Watts por Metro quadrado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de USD/Watt dos painéis fotovoltaicos ao longo dos anos no mundo. (Our World in Data, 2024).....	9
Figura 2 – Diferença entre a célula fotovoltaica e o módulo fotovoltaico.....	13
Figura 3 – Estratificação dos materiais em um módulo fotovoltaico de silício multicristalino. Adaptado de Padlewski (2014).....	15
Figura 4 – Custo privado do método FRELP [R\$/m ²]. Adaptado de Markert et al. (2020).....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição relativa de um módulo solar de c-Si. Adaptado de Latunussa et al...	15
Tabela 2 – Tecnologias de Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos e suas Características.....	23
Tabela 3 – Possibilidades de reinserção dos diferentes componentes provenientes da reciclagem de módulos fotovoltaicos.....	26
Tabela 4 – Projeção de Volume de Resíduos de Painéis Fotovoltaicos em toneladas (t) e Oportunidades de Mercado. Adaptado de Weckend et al. (2016).....	29
Tabela 5 – Tipo de Custo do processo de reciclagem. Adaptado de Markert et al. (2020).....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Contextualização.....	9
1.2. Importância e Motivação do Estudo.....	11
1.3. Objetivo Geral.....	12
1.3.1. Objetivos específicos.....	12
1.4. Metodologia.....	13
1.5. Estrutura do Trabalho.....	14
2. VISÃO GERAL DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	17
2.1. O que são módulos fotovoltaicos e sua estrutura.....	17
2.2. Tecnologias, fabricação, componentes.....	18
2.3. Emissão de CO2 na fabricação.....	19
2.4. Desafios ambientais e técnicos relacionados ao descarte de módulos.....	21
2.4.1. Tecnologias existentes de reciclagem.....	21
2.4.2. Destinação de Si e componentes.....	24
2.5. Cenário mundial e brasileiro da reciclagem desses materiais.....	26
3. ANÁLISE DO MERCADO DE RECICLAGEM NO BRASIL.....	27
3.1. Tamanho do mercado e potencial de crescimento.....	27
3.2. Principais players envolvidos na cadeia de reciclagem.....	29
3.3. Comparação com o mercado internacional.....	30
4. VIABILIDADE ECONÔMICA.....	30
4.1. Análise dos custos envolvidos na reciclagem de módulos.....	30
4.2. Modelos de negócios possíveis e lucratividade.....	32
4.3. Impacto da economia circular e retornos financeiros.....	34
5. CENÁRIO POLÍTICO E REGULAÇÃO NO BRASIL.....	35
5.1. Avaliação das políticas públicas existentes.....	35
5.1.1. Nova PL 998/2024.....	35
5.1.2. Método de incentivo à reciclagem.....	36
5.2. Discussão sobre a regulação do descarte e reciclagem de eletrônicos.....	37
5.3. Sugestões para o aprimoramento da legislação.....	39
6. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O FUTURO.....	40
6.1. Desafios na reciclagem de resíduos fotovoltaicos no Brasil para a implementação de uma indústria forte.....	40
6.1.1. Desafios técnicos.....	40
6.1.2. Desafios econômicos.....	41
6.1.3. Desafios regulatórios.....	42
6.2. Oportunidades para inovação e crescimento no setor.....	43
6.3. Viabilizar a fabricação de módulos nacionais.....	44
7. CONCLUSÃO.....	45

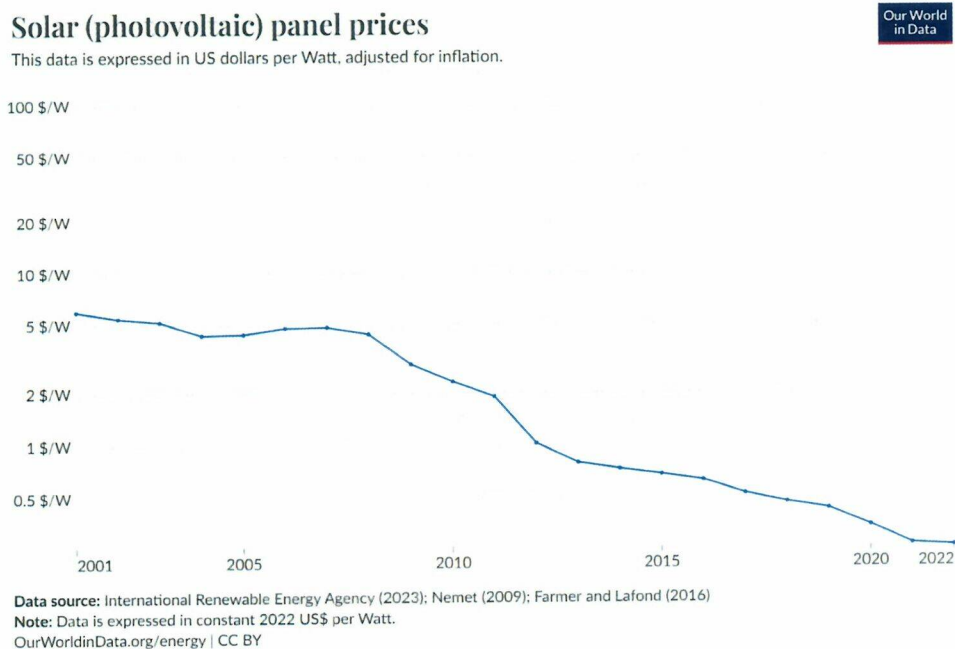
1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Nos últimos anos, a crescente demanda de usinas fotovoltaicas tem sido impulsionada por uma combinação de fatores, incluindo a busca por fontes de energia renováveis, a preocupação com a sustentabilidade ambiental e a redução dos custos associados à tecnologia fotovoltaica. De acordo com o site da IRENA (2021a), a capacidade instalada mundial foi de 22.817 MW (2009) para 578.553 MW (2019) em apenas uma década, em 2018, a capacidade instalada foi de 480.984 MW.

Essa expansão reflete a necessidade global de diversificação da matriz energética e a urgência de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, promovendo uma transição para um sistema energético mais limpo e eficiente. Uma justificativa para o aumento e viabilização das instalações fotovoltaicas como um todo, se dá pela constante queda no preço dos módulos. No ano de 2001, o valor médio global dos módulos era de 5,97 dólares por watt. Em 2022, esse valor diminuiu para 0,26 dólares por watt, o que representa uma diminuição absoluta de 5,72 dólares e uma alteração relativa de -96% (Our World in Data, 2024). Esta diminuição nos custos tem promovido a implementação da tecnologia fotovoltaica em várias áreas, incluindo o Brasil, favorecendo sua incorporação na matriz energética do país.

Figura 1 – Gráfico de USD/Watt dos painéis fotovoltaicos ao longo dos anos no mundo.



Fonte: Our World in Data, (2024)

No Brasil, o setor fotovoltaico tem apresentado um crescimento expressivo, contribuindo para a inclusão da energia solar na matriz energética nacional.

Entretanto, o aumento da instalação de painéis fotovoltaicos também levanta questões críticas sobre a gestão de resíduos ao final da vida útil desses dispositivos. A maioria dos módulos fotovoltaicos tem uma vida útil média de 25 a 30 anos, porém é importante entender que nem todos os módulos chegarão nessa marca, devido a danos durante a instalação, tempestades, falhas de componentes ou viabilidade econômica para substituição antes do esperado.

Silva (2021) analisa as falhas em módulos fotovoltaicos (FV), independentemente da tecnologia e aplicação, identificando três categorias principais: defeitos infantis, defeitos de meia-idade e falhas de desgaste. As falhas infantis, também conhecidas como precoces, acontecem nos primeiros quatro anos após a instalação (com uma média de dois anos), sendo comumente provocadas por deterioração provocada pela luz, planejamento impróprio, montagem imprópria e dificuldades de construção. Questões frequentes neste estágio incluem defeitos em sistemas elétricos, caixas de junção, controladores de carga, cabeamento e aterramento (KÖNTGES et al., 2014).

As falhas de meia-vida tendem a se manifestar entre cinco e onze anos após a instalação, geralmente associadas à deterioração do revestimento anti reflexo do vidro, descoloração do acetato de vinil etileno (EVA), deformação e fissuras no isolamento celular. A exposição a forças mecânicas, tais como vento e neve, além de alterações de temperatura, pode resultar em falhas de contato, quebras de vidro e defeitos em diodos (DeGraaff, 2011; KÖNTGES et al., 2014; Padlewski, 2014; Vodermeier, 2013).

Finalmente, as falhas de desgaste começam a aparecer aproximadamente doze anos após a instalação até o término da vida útil dos módulos, com um crescimento exponencial das falhas de meia-idade e uma corrosão intensa nas células e interconectores. Pesquisas indicam que aproximadamente 40% dos módulos nesta etapa possuem microfissuras em pelo menos uma célula (DeGraaff, 2011; Padlewski, 2014; Vodermeier, 2013).

Diversos estudos têm sido conduzidos para prever a quantidade de resíduos provenientes da energia solar fotovoltaica (FV) produzidos ao longo do tempo, diz Silva (2021). Por exemplo, Paiano (2015) previu que o volume total de resíduos produzidos entre 2012 e 2038 será de aproximadamente 1.957.099 toneladas, referentes às instalações

fotovoltaicas realizadas entre 1987 e 2013. Adicionalmente, a pesquisa estimou a eliminação de aproximadamente 6.281.868 toneladas de resíduos entre 2039 e 2050, o que corresponde às instalações realizadas de 2014 a 2025. Portanto, a estimativa global de resíduos fotovoltaicos para 2050 é de cerca de 8.238.967 toneladas.

Neste cenário, o propósito desta monografia é conduzir uma avaliação completa sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos, discutindo o assunto sob três perspectivas principais: o mercado de reciclagem no Brasil, a viabilidade financeira do procedimento e o panorama político e regulatório. Primeiramente, será explicado o conceito e a organização dos módulos fotovoltaicos, seguido de um debate acerca dos obstáculos ambientais e técnicos associados ao descarte desses aparelhos. Em seguida, discutiremos o panorama global e brasileiro da reciclagem, abrangendo o tamanho do mercado, as possibilidades de expansão e uma comparação entre o Brasil e outras nações.

Posteriormente, o estudo tratará da viabilidade financeira da reciclagem de módulos fotovoltaicos, debatendo os gastos associados, possíveis modelos de negócio, o efeito da economia circular e os ganhos financeiros que podem ser obtidos através da reciclagem. Finalmente, será realizada uma avaliação do contexto político e regulatório brasileiro, levando em conta as políticas públicas vigentes, a normatização do descarte e reciclagem de aparelhos eletrônicos, bem como propostas para o aperfeiçoamento da legislação.

Dessa forma, esta monografia visa contribuir para uma compreensão mais profunda do papel da reciclagem de módulos fotovoltaicos na promoção da sustentabilidade e para a criação de uma matriz energética mais resiliente.

1.2. Importância e Motivação do Estudo

A expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil e globalmente apresenta não só vantagens ambientais e econômicas, mas também novos obstáculos, particularmente ligados ao descarte dos resíduos ao término da vida útil dos módulos. É crucial mudar para fontes de energia renováveis para lidar com as alterações climáticas e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Contudo, o crescimento na implementação de sistemas fotovoltaicos indica que, dentro de alguns anos, milhões de toneladas de resíduos provenientes desses sistemas precisarão ser adequadamente administradas.

Com uma grande potência para energia solar, o Brasil se destaca como um dos pioneiros na aplicação da tecnologia fotovoltaica. No entanto, a ausência de infraestrutura e normas apropriadas para a reciclagem e reutilização de módulos fotovoltaicos constitui uma ameaça ambiental é um obstáculo econômico para a nação. Portanto, a relevância deste estudo reside na necessidade de entender e aprimorar as práticas de reciclagem desses módulos, levando em conta o potencial de recuperação de materiais como o silício e os metais, fundamentais para várias indústrias.

Esse trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia sustentável de reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, considerando as dimensões econômicas, ambientais e políticas. A motivação está, portanto, na busca por soluções que ampliem o impacto positivo da energia solar, garantindo que os benefícios dessa tecnologia permaneçam em todas as etapas de seu ciclo de vida, do uso até o descarte.

1.3. Objetivo Geral

A finalidade deste estudo é analisar a situação atual da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, destacando as principais possibilidades e desafios. A ênfase será no crescimento sustentável da indústria, levando em conta os aspectos políticos, econômicos e ambientais que podem auxiliar no avanço dessa prática no país.

1.3.1. Objetivos específicos

Analisar o mercado de reciclagem em âmbito nacional e global, reconhecendo os principais participantes, tecnologias e processos existentes no Brasil, e comparando-o com nações que já têm uma cadeia de reciclagem estabelecida, com o objetivo de analisar o mercado de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Este propósito tem como meta reconhecer as falhas e possibilidades que o mercado brasileiro pode aproveitar para impulsionar a reciclagem fotovoltaica.

Analisar os custos e vantagens da reciclagem de módulos fotovoltaicos, considerando a quantidade de resíduos, os gastos logísticos, a eficácia tecnológica e os retornos financeiros para os participantes da cadeia produtiva, com o objetivo de avaliar a

viabilidade financeira das práticas de reciclagem. Adicionalmente, procura-se compreender a influência da reciclagem fotovoltaica no cenário da economia circular.

Entender a situação política brasileira em relação às normas e incentivos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, identificando possíveis falhas e sugerindo melhorias para as políticas e normas vigentes é crucial para fortalecer e estimular a cadeia de reciclagem.

Na análise selecionadas publicações com temáticas relacionadas a assuntos como:

- Panorama da reciclagem de eletrônicos no brasil;
- Reciclagem de painéis fotovoltaicos no brasil;
- Descarte e logística reversa de painéis;
- Políticas de incentivo ao descarte de eletrônicos no brasil;
- Fabricação de painéis fotovoltaicos;

Tais estudos serviram de base para as contribuições comparativas exibidas ao final deste trabalho.

1.4. Metodologia

Este estudo foi realizado seguindo uma metodologia organizada, que abrange desde a coleta de informações bibliográficas até a análise de mercado e a análise de viabilidade. Inicialmente, nos Procedimentos de Pesquisa de Informação, foi conduzido um estudo bibliográfico nas principais bases de dados acadêmicas, tais como ScienceDirect, Scopus e Google Scholar, com a finalidade de coletar o panorama atual sobre a reciclagem de módulos de energia solar. Para garantir a precisão e atualidade das informações, foi consultado publicações de entidades internacionais, como a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e Our World in Data, que disponibilizaram informações recentes sobre a capacidade instalada, custos e progressos tecnológicos no campo.

Posteriormente, a Análise e Síntese dos Dados recolhidos envolveu reconhecer as principais tendências mundiais e adaptá-las ao cenário brasileiro. Esta fase englobou a

estruturação das informações em aspectos econômicos, tecnológicos e ambientais, permitindo uma estrutura ordenada e consistente para a interpretação dos dados ao longo do projeto.

A identificação dos principais atores e tecnologias disponíveis no Brasil foi realizada para o Levantamento de Mercado, concentrando-se nas iniciativas e empresas envolvidas na reciclagem fotovoltaica. Adicionalmente, efetuou-se uma análise comparativa entre o contexto brasileiro e os mercados internacionais para destacar as deficiências e possibilidades existentes no Brasil. Isso possibilitou identificar áreas de convergência e potenciais pontos de reforço para a reciclagem nacional.

Finalmente, o Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica foi conduzido com base na análise dos custos, vantagens e retornos financeiros da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, levando em conta fatores como logística e obstáculos técnicos. Além da avaliação financeira, levaram-se em conta os efeitos no modelo de economia circular, enfatizando como a reciclagem auxilia na sustentabilidade ambiental e na diminuição de resíduos no setor energético.

1.5. Estrutura do Trabalho

Capítulo 2 - VISÃO GERAL DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Trata de fornecer uma visão geral dos módulos fotovoltaicos, equipamentos cruciais na transformação da luz solar em eletricidade, explicando sua composição, estrutura e as variadas tecnologias empregadas, como o silício cristalino e os filmes finos. Cada geração de módulos apresenta atributos exclusivos que impactam a eficiência e o custo, influenciando a seleção para várias aplicações.

Adicionalmente, discutem-se os obstáculos ambientais e técnicos no descarte de módulos, tais como a existência de materiais perigosos e valiosos, bem como as tecnologias de reciclagem disponíveis: métodos mecânicos, térmicos e químicos. A seção investiga a possibilidade de reutilização de materiais, como o silício, e suas possibilidades de reciclagem, o panorama global e brasileiro para a reciclagem desses detritos, bem como as emissões de CO₂ ligadas à produção e ao descarte, ressaltando as práticas e normas emergentes para uma administração sustentável.

Capítulo 4 - ANÁLISE DO MERCADO DE RECICLAGEM NO BRASIL

No Brasil, o setor de reciclagem de módulos fotovoltaicos, ainda em fase inicial, está sendo estimulado pelo aumento exponencial da energia solar nos últimos anos. O aumento na procura por energias renováveis e os incentivos fiscais contribuíram para a ampliação da capacidade instalada. Prevê-se que os módulos instalados a partir de 2015 começarão a ser trocados aproximadamente em 2040, resultando em um aumento na demanda por reciclagem. Com o avanço do setor e as projeções de eliminação de milhões de módulos, é crucial estabelecer uma cadeia de reciclagem para suprir essa necessidade futura.

A organização da cadeia de reciclagem já está se formando, com a participação de fabricantes de módulos e empresas de reciclagem de eletrônicos e metais, avaliando a oportunidade de ampliar suas atividades para o segmento fotovoltaico. O progresso das regras de logística reversa e o surgimento de startups voltadas para a economia circular são encorajadores, à medida que universidades e o setor privado trabalham juntos para desenvolver tecnologias de recuperação de materiais valiosos, como o silício. Contudo, em relação ao cenário mundial, o Brasil ainda apresenta um atraso na regulamentação e infraestrutura de reciclagem, proporcionando chances para implementar as melhores práticas internacionais e fomentar um mercado sustentável.

Capítulo 5 - VIABILIDADE ECONÔMICA

No Brasil, a viabilidade financeira da reciclagem de módulos fotovoltaicos está fortemente ligada aos custos ligados ao processo, que mudam de acordo com a tecnologia e a dimensão da operação. Investir em tecnologias de ponta pode diminuir as despesas operacionais ao melhorar a eficácia na recuperação de materiais preciosos, como silício e prata. Ademais, o uso de energia renovável no Brasil pode resultar em custos energéticos inferiores em relação a nações que dependem de combustíveis fósseis. No entanto, desafios como a logística reversa e a necessidade de infraestrutura adequada continuam a ser obstáculos a serem superados. O método FRELP, proposto por Markert et al. (2020), revela um custo total de R\$68,89 por m² para a reciclagem, enquanto os materiais recuperados oferecem um benefício econômico de R\$78,74 por m², sugerindo uma viabilidade econômica da reciclagem.

São essenciais modelos de negócios sustentáveis, baseados em práticas globais, para potencializar a rentabilidade da reciclagem de módulos fotovoltaicos. A cooperação entre produtores e companhias de reciclagem, aliada a políticas regulatórias que promovam a recuperação de materiais, tem o potencial de converter o setor em uma fonte significativa de lucros. A implementação de uma economia circular tem potencial para diminuir os gastos com matéria-prima, valorizar materiais recuperados e gerar novos postos de trabalho, trazendo vantagens tanto para o meio ambiente quanto para a economia do Brasil. Portanto, a aplicação dessas táticas é essencial para assegurar a sustentabilidade e a viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos no país.

Capítulo 6 - CENÁRIO POLÍTICO E REGULAÇÃO NO BRASIL

A situação política e a legislação brasileira para a reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda não possuem uma estrutura e políticas sólidas, mesmo com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Apesar dessa política estar focada na gestão de resíduos sólidos em geral, não existem orientações específicas para os resíduos provenientes de painéis solares, mesmo com o avanço do setor. A implementação do Projeto de Lei 998/2024 representa uma tentativa de regulamentar este setor, sugerindo um quadro regulatório específico que abrange a responsabilidade adicional do produtor, demandando que fabricantes e importadores implementem sistemas de coleta e reciclagem, além de incorporar a logística reversa para assegurar a correta destinação desses materiais aos centros de reciclagem.

Para avançar na reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, é necessário um sistema de incentivos financeiros que incentive o setor. Sugestões como incentivos fiscais, atribuição de créditos de carbono e auxílios governamentais para infraestrutura e inovação tecnológica são essenciais para viabilizar financeiramente essa cadeia. Este tipo de suporte não só promoveria o avanço das tecnologias de reciclagem, mas também promoveria a economia circular e o crescimento sustentável no Brasil, preparando o país para enfrentar os obstáculos da reciclagem de módulos solares e assegurar uma transição energética mais limpa e consciente.

Capítulo 7 - DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O FUTURO

No Brasil, a reciclagem de módulos fotovoltaicos se depara com vários obstáculos que prejudicam a construção de uma indústria sólida. As barreiras têm caráter técnico, econômico e regulatório. Em termos técnicos, a variedade de materiais, tais como vidro, silício e metais preciosos, demanda métodos de separação complexos que não são facilmente acessíveis no país. Esta deficiência tecnológica impede a recuperação de materiais valiosos e resulta na dependência de tecnologias estrangeiras, aumentando os custos e limitando o desenvolvimento local. Ademais, a ausência de estímulo à pesquisa e inovação torna o Brasil menos competitivo em relação a nações pioneiras na reutilização de módulos, como a Alemanha e o Japão. Em termos econômicos, a implementação de usinas de reciclagem requer investimentos consideráveis, com retorno esperado a longo prazo. No entanto, os preços dos materiais recuperados podem não ser suficientes para cobrir os gastos operacionais, tornando a atividade menos atrativa. A legislação também apresenta falhas, não possuindo orientações precisas para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, o que complica a criação de estratégias eficientes e a aplicação de práticas sustentáveis.

Em contrapartida, o cenário de reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil oferece oportunidades consideráveis. A procura por avanços tecnológicos pode resultar na criação de técnicas de reciclagem mais eficazes e sustentáveis, fomentando a expansão do setor. Ademais, o aumento na procura por soluções de descarte e reaproveitamento proporciona um mercado em expansão, favorável à geração de empregos e à criação de valor econômico. A produção nacional de módulos fotovoltaicos se apresenta como uma opção promissora, possibilitando ao Brasil diminuir sua dependência de importações e incorporar práticas de economia circular, empregando materiais reciclados. Essa fusão não só consolidou a indústria local, como também ajudaria na sustentabilidade ambiental, fomentando um ciclo de produção que vai desde a extração de matérias-primas até a reciclagem de módulos descartados.

2. VISÃO GERAL DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

2.1. O que são módulos fotovoltaicos e sua estrutura

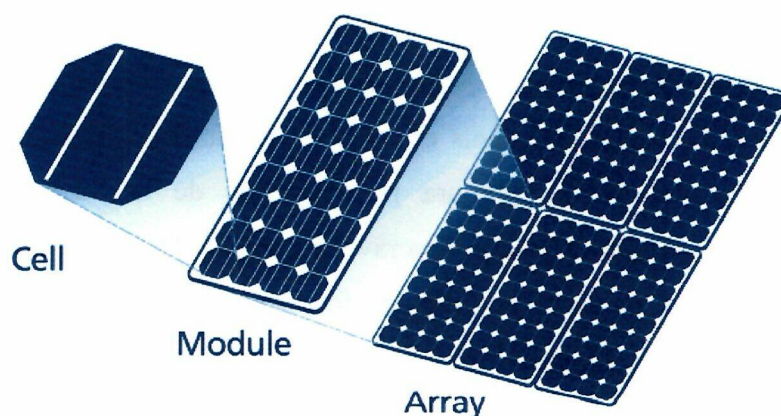
Os módulos fotovoltaicos são dispositivos que convertem a energia solar em energia elétrica, sendo uma das principais tecnologias utilizadas na geração de energia renovável. Eles são compostos por células solares, que desempenham a função principal de converter a luz

solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Os módulos são geralmente encapsulados por materiais que garantem sua durabilidade e proteção contra intempéries.

Uma célula fotovoltaica é definida como um semicondutor em forma de *Wafer* estruturada de modo a formar um campo elétrico (positivo de um lado e negativo do outro). Ligados a este semicondutor encontram-se condutores elétricos capazes de transportar os elétrons libertados. Um conjunto de células fotovoltaicas dispostas numa estrutura é um módulo fotovoltaico (ou painel fotovoltaico).

A Figura 2 ilustra a diferença entre a célula fotovoltaica e o módulo fotovoltaico. Em sua grande maioria, os sistemas de geração utilizam-se diversos módulos lado a lado para formar uma matriz, quanto maior a quantidade de módulos, maior o potencial de geração de energia elétrica.

Figura 2 – Diferença entre a célula fotovoltaica e o módulo fotovoltaico



Fonte: VASTAV et al., 2016

2.2. Tecnologias, fabricação, componentes

Classificação dos módulos se em diferentes formas, dentre elas, pode-se destacar a classificação por geração, dividindo-os em três grupos: os de 1^a, 2^a e 3^a geração.

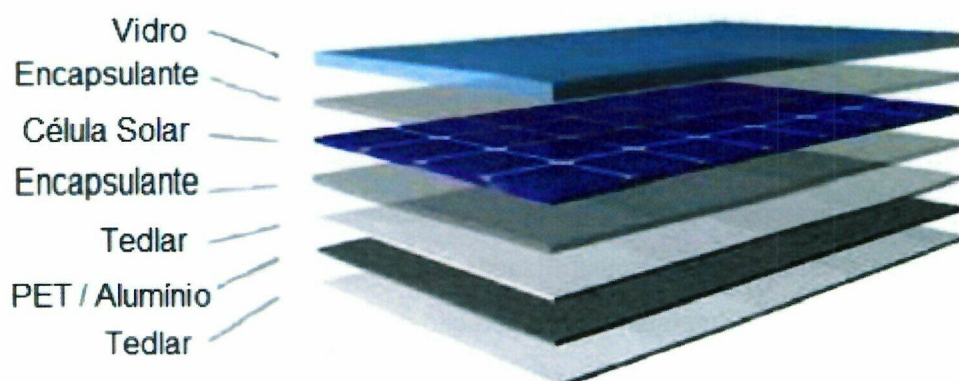
1^a Silício Cristalino (Si): Representa a maior parte do mercado e pode ser dividido em dois tipos principais: monocristalino e policristalino. O silício cristalino oferece alta eficiência de conversão, embora sua fabricação seja intensiva em energia e matérias-primas.

2ª Filmes Finos (Thin-Film): Uma alternativa ao silício, utiliza materiais como telureto de cádmio (CdTe) e seleneto de cobre índio gálio (CIGS). Embora tenham menor eficiência, são mais leves e flexíveis, além de exigirem menos energia durante a fabricação.

Segundo Fernando, a terceira geração é um pouco ambígua na definição de quais tecnologias são englobadas, embora haja uma tendência de incluir tecnologias orgânicas, pontos quânticos (PQs), células tandem/multijunção, células de portadores quentes (hot carriers), células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) e tecnologias de upconversion. Uma definição útil para a terceira geração de células solares é a seguinte: são células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar que as células baseadas em um único band-gap eletrônico. De forma geral, a terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade.

Segundo Prado (2018), cada módulo de silício cristalino é formado por elementos que exercem funções particulares. Uma camada de vidro temperado, produzido a partir de soda-cal, proporciona resistência mecânica e clareza visual. As células de energia solar, que contêm o material semicondutor, são envoltas por duas camadas de um material polimérico isolante, denominado encapsulante. São colocados contatos metálicos de cobre revestidos de estanho e chumbo entre a célula fotovoltaica e o encapsulante, assegurando a ligação elétrica entre as células. O revestimento traseiro, também conhecido como backsheet, é majoritariamente formado por Tedlar/PET/Tedlar (TPT, que representa 70% do mercado), Polyamide-PET-Polyamide (APA, com 10% do mercado), ou ainda Tedlar-PET-Poliamida (TPA), Poliolefina e vidro (em expansão). Além disso, uma camada intermediária de reflexão de luz é composta por alumínio (conhecida como Al-BSF, campo de superfície posterior de alumínio). Uma construção sólida de alumínio proporciona leveza e durabilidade ao módulo. Finalmente, utilizamos selantes de silicone para vedar a conexão entre o vidro e a estrutura de alumínio.

Figura 3 – Estratificação dos materiais em um módulo fotovoltaico de silício multicristalino.



Fonte: Adaptado de Padlewski (2014)

A distribuição dos metais em um módulo fotovoltaico de c-Si citado por Prado (2018) e estimada por Latunussa et al (2016), indicado na tabela 1.

Tabela 1 – Composição relativa de um módulo solar de c-Si.

Componente	Porcentagem (%)
Vidro (com 0,01-1% Antimônio/kg de vidro)	70
Moldura de alumínio (Al)	18
Encapsulante (EVA)	5,1
Célula Solar (c-Si)	3,65
Backsheet (PVF)	1,5
Cabos (Cu e polímeros)	1
Condutor interno (Al)	0,53
Condutor interno (Cu)	0,11
Prata (Ag)	0,053
Outros Metais (Sn, Pb)	0,053
Total	100

Fonte: elaboração própria com base nos dados de Latunussa et al (2016).

2.3. Emissão de CO₂ na fabricação

A produção de módulos fotovoltaicos está diretamente associada a emissões de CO₂, principalmente devido ao uso intensivo de energia no processo de fabricação, especialmente

no caso dos módulos de silício cristalino. Esse processo exige altos níveis de pureza e um consumo significativo de energia para a purificação e o corte do silício (KLEIN et al., 2020). No entanto, para entender melhor a pegada de carbono associada à fabricação dos módulos, é fundamental considerar também as emissões de CO₂ derivadas da extração e processamento das matérias-primas utilizadas.

O silício, matéria-prima central para a maioria dos módulos fotovoltaicos, passa por um processo altamente energético para atingir o grau de pureza necessário. Esse processo envolve a redução do quartzo (sílica) em fornos elétricos, resultando em emissões que variam entre 30 e 60 kg de CO₂ por quilograma de silício produzido (FTHENAKIS; KIM, 2008). Outros materiais usados na fabricação dos módulos, como cobre, alumínio, vidro e plásticos, também possuem suas próprias pegadas de carbono. A produção de alumínio, por exemplo, é particularmente intensiva em termos de energia, gerando emissões que podem chegar a 12 a 16 toneladas de CO₂ por tonelada de alumínio produzido (JOUBERT et al., 2013).

Além da extração das matérias-primas, a própria fabricação dos módulos fotovoltaicos gera emissões consideráveis de CO₂. A produção das células solares e a montagem dos módulos são processos que exigem um consumo elevado de energia. Estima-se que a produção de um módulo fotovoltaico resulte em emissões de CO₂ na faixa de 20 a 70 g de CO₂ por kWh gerado ao longo da vida útil do módulo (KLEIN et al., 2020). Essa variação depende de fatores como a eficiência dos processos produtivos e as fontes de energia utilizadas nas fábricas.

Quando calculada ao longo de seu ciclo de vida completo, que inclui a extração das matérias-primas, fabricação, transporte, instalação e operação, a pegada de carbono de um módulo fotovoltaico varia entre 30 e 60 g de CO₂ por kWh gerado durante sua vida útil (FTHENAKIS; KIM, 2009). Esse valor é relativamente baixo em comparação com fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis. Com o avanço de tecnologias mais eficientes e a adoção de fontes renováveis no processo de fabricação, espera-se que a pegada de carbono dos módulos fotovoltaicos possa ser ainda mais reduzida ao longo do tempo (JOUBERT et al., 2013).

2.4. Desafios ambientais e técnicos relacionados ao descarte de módulos

O descarte de módulos fotovoltaicos apresenta desafios ambientais e técnicos, uma vez que contém materiais tóxicos e valiosos que podem impactar o meio ambiente se não

forem tratados adequadamente. Um dos maiores desafios é o crescimento previsto de resíduos de módulos à medida que os primeiros sistemas instalados atingem o fim de sua vida útil.

2.4.1. Tecnologias existentes de reciclagem

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode ser feita através de vários processos, incluindo a reciclagem mecânica, térmica e química, cada uma com suas características específicas e eficácia na recuperação de materiais.

A reciclagem mecânica envolve a desmontagem dos módulos fotovoltaicos e a sua trituração, o que facilita a identificação de seus componentes. Este procedimento é eficiente na restauração de vidro, metais e plásticos, elementos de grande valor presentes nos módulos. A trituração possibilita a produção de materiais recicláveis que podem ser reincorporados à cadeia produtiva, diminuindo o desperdício e fomentando a economia circular.

O processo térmico envolve o tratamento dos módulos em altas temperaturas para recuperar silício policristalino. Fiandra et al. (2019, 2018) descreveram um processo que começou com o corte manual do painel, seguido do aquecimento em um forno tubular a altas temperaturas por uma hora. Este método também foi complementado por Pagnanelli et al. (2017), que aplicaram trituração mecânica para reduzir o vidro, seguida de tratamento térmico, resultando em altas taxas de recuperação desse material. Além disso, combinaram pré-tratamento térmico com lixiviação ácida, permitindo a recuperação de metais como cobre e estanho. Outra abordagem, desenvolvida por Shin et al., utilizou aquecimento controlado para separar as camadas de wafers de silício multicristalino, recuperando células com eficiência comparável às originais.

Finalmente, a reciclagem química é um processo que emprega solventes para eliminar camadas indesejadas dos módulos. Doi et al. (2001) e colaboradores utilizaram solventes orgânicos para remover a camada de EVA (acetato de polivinila) dos painéis solares, o que permitiu a reutilização dos painéis solares de silício. Kim e Lee aceleraram o processo de dissolução da camada de EVA ao combinar solventes e ultrassom, mesmo que isso gerasse subprodutos perigosos que necessitam de uma gestão apropriada. Wang e Fthenakis (2005) empregaram resinas de troca iônica na separação de metais, tais como cádmio e telúrio, obtendo elevadas taxas de recuperação. Em contrapartida, Dattilo descreveu a obtenção química de metais de painéis CIGS (Cobre, Índio, Gálio, Selênio), utilizando eletrólise para recuperar materiais como cobre e selênio, o que contribui para a eficácia dos processos de

Os processos físicos, térmicos e químicos de reciclagem de módulos fotovoltaicos apresentam desafios significativos, tanto ambientais quanto operacionais. Os métodos físicos, como a trituração mecânica, geram grandes quantidades de poeira contendo vidro, que não apenas é tóxica, mas também contribui para a poluição sonora, conforme observado em diversos países que enfrentam dificuldades na implementação de tecnologias de reciclagem. Além disso, a remoção da camada de EVA por solventes inorgânicos em processos químicos resulta na emissão de óxidos de nitrogênio e outros gases prejudiciais, representando riscos à saúde humana (Bruton, 1994). Mesmo o reuso de wafers de silício enfrenta barreiras, como a remoção complexa das armações e a difícil gestão dos líquidos residuais.

A dissolução da camada de EVA com solventes orgânicos, embora eficaz, é um processo lento que pode ser acelerado com o uso de ultrassom. No entanto, isso gera grandes volumes de resíduos orgânicos derretidos, que são difíceis de tratar. Assim, embora os métodos térmicos e químicos sejam avançados, sua principal desvantagem é a produção de gases tóxicos e o alto consumo de energia. Segundo Chowdhury et al. (2020), esses fatores tornam a reciclagem de módulos fotovoltaicos um desafio em escala industrial, pois exigem um equilíbrio cuidadoso entre eficiência e impacto ambiental. Em resumo, a combinação de métodos físicos, térmicos e químicos requer melhorias para mitigar os efeitos nocivos e aumentar a viabilidade econômica e ambiental do processo de reciclagem.

De acordo com o Correia (2024), a técnica SSTD, criada em 2021, é vista como uma abordagem viável e gerenciável para a recuperação não destrutiva de células solares, unindo processos de dilatação solvotérmica e decomposição térmica. Durante a decomposição térmica da espuma de EVA (Acetato-Vinilo-Etileno), as células de silício são destruídas devido à liberação de gases aprisionados entre as células e o vidro. Durante a dilatação solvotérmica, um material é adicionado a um solvente em temperaturas e pressões elevadas, formando canais de escape e liberando rapidamente o gás retido. Esta metodologia possibilita a restauração de células de silício sem prejuízos após a decomposição térmica. Por outro lado, o método MACE, seguindo princípios análogos, permite a conversão de células recuperadas em discos de silício de alta pureza e baixa refletividade, prontos para a fabricação de novas células após aprimoramentos na textura.

A tabela 2 fornece um panorama completo de algumas das técnicas de reciclagem de módulos fotovoltaicos abordadas e classifica cada técnica de acordo com o seu tipo de reciclagem, sendo química, térmica ou mecânica. Ela detalha as principais características

positivas e negativas de cada tecnologia, possibilitando uma avaliação comparativa dos processos existentes.

Tabela 2 – Tecnologias de Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos e suas Características.

Tecnologia/Processo	Tipo de Reciclagem	Vantagens	Desvantagens	Autor
Dissolução em solvente orgânico	Química	Fácil remoção do EVA Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio	Adaptado de Scolla (2020).
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Química	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio	Adaptado de Scolla (2020).
Calor/Eletrotérmico	Térmica	Recuperação de silício policristalino Altas taxas de recuperação de vidro	Processo lento Geração de emissões prejudiciais	Adaptado de Scolla (2020); Fiandra et al. (2019, 2018)
Separação mecânica	Mecânica	Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV	Adaptado de Scolla (2020).
Pirólise	Térmica	Recuperação de materiais (80% do sanduíche e de 100% do vidro) Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células	Adaptado de Scolla (2020).
Dissolução em solvente (Ácido nítrico)	Química	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio	Adaptado de Doi et al. (2001).
Desintegração física	Mecânica	Capacidade de tratar resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Gera resíduos com metais pesados Danos às células FV	Adaptado de Scolla (2020).

Tecnologia/Processo	Tipo de Reciclagem	Vantagens	Desvantagens	Autor
Mecânico (seco e úmido)	Mecânica	Minimiza impactos dos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros	Adaptado de Scolla (2020).
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Térmica	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio; alto consumo de energia	Adaptado de Scolla (2020).
Solução química	Química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas	Adaptado de Scolla (2020).
Separação com Resinas de Troca Iônica	Química	Altas taxas de recuperação de metais como cádmio e telúrio	Complexidade do processo	Adaptado de Wang e Fthenakis (2005)
Método SSTD	Química/Térmica	Recuperação não destrutiva de células solares; preserva células de silício	Complexidade na implementação; tecnologia recente	Adaptado de Correia (2024)
Método MACE	Química/Térmica	Conversão de células em discos de silício de alta pureza	Requer aprimoramentos na textura; implementação complexa	Adaptado de Correia (2024)

Fonte: elaboração própria com base nos dados de Doi et al. (2001); Scolla (2020); Fiandra et al. (2019, 2018); Wang e Fthenakis (2005) e Correia (2024)

2.4.2. Destinação de Si e componentes.

De acordo com Silva (2021), o valor econômico da reciclagem de módulos fotovoltaicos (FV) está na utilização de recursos escassos, tais como prata, silício, cobre, gálio, índio, germânio e telúrio, além de materiais tradicionais como o alumínio e o vidro (Aryan et al., 2018; BioIS, 2011; Strachala et al., 2017). A administração de módulos em declínio pode potencializar a cadeia de valor da energia solar, convertendo o resíduo em um depósito de materiais valiosos para reaproveitamento na produção de novos módulos ou comercialização nos mercados globais de commodities (Kadro e Hagfeldt, 2017; Weekend et al., 2016).

O silício (Si) é um dos principais materiais recuperados, especialmente nos módulos de silício cristalino. Outros componentes como vidro, alumínio e metais também podem ser reciclados, mas enfrentam limitações em relação ao seu valor econômico e à dificuldade

técnica de separação. Tecnologias que permitem a recuperação de metais preciosos (como a prata) e materiais raros também são essenciais para aumentar a viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos.

A abordagem sugerida por Rodrigues Santos et al. (2020) inclui soluções já utilizadas em ambientes industrial e laboratorial, com o objetivo de expor o wafer de silício - o material mais frequentemente utilizado e, no futuro, o mais descartado nas células solares - para reprocessamento. Uma das etapas mais complicadas na produção dessas células é a purificação e o corte do silício. Assim, a reutilização do substrato possibilita o processamento de wafers com menor exigência tecnológica. Esta estratégia também permite diminuir o impacto no meio ambiente e potencializar as vantagens econômicas provenientes do descarte de fontes renováveis em fase final de vida. O texto atesta a efetividade e viabilidade técnica, em ambiente laboratorial, de um método para a extração de wafers de silício industrial, destacando a utilização de soluções químicas automatizadas e seu potencial uso em plantas de reprocessamento de resíduos solares.

Esta estratégia representa um progresso notável no reprocessamento de substratos de silício (Si), especialmente ao possibilitar uma metodologia que pode ser replicada em laboratório, com a possibilidade de uso em instalações industriais. A técnica, ao facilitar o reaproveitamento de wafers de silício, contribui para um ciclo de produção mais ecológico e proporciona uma opção ao descarte em massa de células solares. Isso aumenta a recuperação de recursos e diminui os efeitos ambientais ligados ao término da vida útil desses materiais. No final das contas, isso enfatiza a importância da reciclagem na indústria fotovoltaica e promove a criação de uma economia circular voltada para as fontes de energia renováveis.

Vários componentes reciclados de módulos fotovoltaicos podem ser reinseridos, destacando a importância econômica e ecológica da recuperação desses materiais. Silva (2021) destaca a relevância do reaproveitamento de metais preciosos, como a prata e o cobre, para a fabricação de novos módulos ou sua venda em mercados internacionais de grãos. Em contrapartida, Silveira (2020) discute o reaproveitamento de vidro, EVA e semicondutores, sugerindo diversas utilizações nas indústrias de vidro, química e fotovoltaica. Esses elementos, ressaltados na tabela 3, não só fomentam a economia circular, como também auxiliam na diminuição do desperdício de recursos limitados, destacando a importância de criar tecnologias eficazes de reciclagem no setor fotovoltaico.

Tabela 3 – Possibilidades de reinserção dos diferentes componentes provenientes da reciclagem de módulos fotovoltaicos.

Componente	Possibilidades da Reinserção	Autor
Vidro	Aplicação nas indústrias de vidro, lâ de vidro, construção e novos módulos fotovoltaicos.	Silveira (2020)
EVA	Aplicação na indústria química e na recuperação de energia de incineração.	Silveira (2020)
Silício (Si)	Aplicação em novos wafers e na indústria fotovoltaica como semicondutor e como agregados para forno de fundição metalúrgica.	Silveira (2020); Silva (2021)
Metais preciosos (prata, cobre, gálio, índio, germânio, telúrio)	Recuperação e reutilização para a produção de novos módulos ou comercialização em mercados globais de commodities.	Silva (2021)
Semicondutor da segunda geração	Aplicação em novas células ou sua reutilização.	Silveira (2020)
Metais com alto valor e Alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original.	Silva (2021)

Fonte: elaboração própria com base nos dados de Silveira (2020) e Silva (2021).

2.5. Cenário mundial e brasileiro da reciclagem desses materiais

O cenário mundial da reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda é emergente, com a União Europeia sendo líder na regulamentação e no desenvolvimento de infraestruturas para a reciclagem de painéis solares. A legislação europeia, como a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE), exige que os fabricantes financiem a coleta e a reciclagem de painéis no final de sua vida útil.

No Brasil, a reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda está em estágio inicial, mas com o rápido crescimento do mercado de energia solar no país, espera-se que a demanda por soluções de reciclagem cresça nos próximos anos. A ausência de regulamentação específica para a reciclagem de painéis fotovoltaicos, no entanto, representa um desafio, assim como a falta de infraestrutura adequada. O desenvolvimento de políticas públicas, incentivos e uma maior conscientização ambiental são fatores críticos para impulsionar essa indústria no Brasil.

3. ANÁLISE DO MERCADO DE RECICLAGEM NO BRASIL

3.1. Tamanho do mercado e potencial de crescimento

No Brasil, o mercado de reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda se encontra em estágio inicial, contudo, é estimulado pelo acelerado desenvolvimento do setor de energia solar nos anos recentes. No momento, o Brasil conta com uma capacidade instalada de aproximadamente 30 GW de energia solar, distribuída entre grandes centrais hidrelétricas e a geração distribuída, incluindo sistemas para residências e estabelecimentos comerciais. Este aumento rápido, especialmente notado a partir de 2015, está ligado ao progresso tecnológico, aos incentivos fiscais e ao crescimento da procura por fontes de energia renováveis, que se revelaram uma opção vantajosa em termos de custo-benefício. Portanto, o Brasil é um dos mercados emergentes mais proeminentes em energia solar (ANEEL, 2023).

No entanto, a expansão dessa indústria também apresenta futuros desafios ambientais, especialmente ligados ao descarte dos módulos fotovoltaicos ao término de sua vida útil. Espera-se que os módulos instalados a partir de 2015 comecem a ser substituídos aproximadamente em 2040. A previsão é de que, até 2020, a quantidade de módulos descartados seja significativa. Para uma capacidade instalada de 20 GW em 2020, isso pode equivaler ao descarte de cerca de 50 a 66 milhões de módulos, levando em conta que cada módulo possui, em média, capacidade entre 300 e 400 W (International Renewable Energy Agency, 2020)

O processo de retrofit de usinas solares, que consiste na troca de módulos e componentes antigos por tecnologias inovadoras, está se tornando cada vez mais frequente, podendo acontecer até mesmo antes do término da vida útil dos sistemas. Pesquisas apontam que o progresso tecnológico e a diminuição dos preços dos novos módulos solares têm estimulado a troca antecipada, principalmente em nações com extensos parques solares. Conforme a Agência Internacional de Energia (MASSON; KAIZUKA, 2021). Nos últimos vinte anos, a eficiência dos módulos solares aumentou consideravelmente, variando de uma média de 15% nos anos 2000 para mais de 22% nos módulos mais recentes. Esta melhoria leva muitos donos de usinas a avaliarem como economicamente benéfico trocar os módulos antigos por versões mais eficazes, mesmo antes de atingirem 25 anos de funcionamento.

No Brasil, um país com um crescimento exponencial no setor solar, essa tendência de retrofit pode se manifestar de forma antecipada. Especificamente, usinas construídas na

década de 2010, com tecnologia menos eficaz em relação às recentes inovações, podem passar por processos de atualização nos próximos 10 a 15 anos. Adicionalmente, uma pesquisa realizada por Oliveira e Santos (2022) indica que, com a diminuição dos custos de novos módulos, o período de retorno do investimento em retrofit pode diminuir consideravelmente, tornando o processo atrativo a partir de 2030, mesmo para sistemas que ainda estão dentro do seu prazo de vida estimado.

Assim, prevê-se um aumento no retrofit de usinas solares no Brasil entre 2030 e 2040, impulsionado não só pelo desgaste dos módulos, mas também pelo aprimoramento da eficiência dos novos modelos disponíveis no mercado, além das políticas de estímulo à transição energética e à sustentabilidade.

Essas projeções evidenciam a importância de planejar uma infraestrutura adequada de reciclagem para os próximos anos. O desenvolvimento de políticas públicas específicas para o descarte e a reciclagem de módulos fotovoltaicos será essencial para mitigar os impactos ambientais e transformar o fim da vida útil dos módulos em uma oportunidade para a economia circular (Fichter & Dorr, 2022).

A reciclagem fotovoltaica também poderá se beneficiar do amplo mercado brasileiro de reciclagem em outros segmentos, como o eletrônico e o metal, que pode atuar como base para o progresso da reciclagem. A nação tem um dos maiores índices de reciclagem de alumínio do planeta, alcançando mais de 95% de reaproveitamento (ABAL, 2023). Além disso, a expansão da infraestrutura de reciclagem de resíduos eletrônicos, impulsionada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), proporciona um cenário propício para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. A experiência adquirida na reciclagem de metais, vidros e peças eletrônicas pode auxiliar na criação de métodos eficazes para a recuperação de materiais valiosos dos painéis solares, consolidando o mercado nacional e fomentando a economia circular no segmento solar.

Até 2030, a China, o Japão, os Estados Unidos e o Brasil devem produzir a maior parte dos resíduos provenientes de painéis fotovoltaicos (PV). A estimativa é que a China acumule entre 200.000 e 1,5 milhão de toneladas de resíduos. O Japão espera acumular entre 200.000 e 1 milhão de toneladas de resíduos até o mesmo ano, ao passo que os Estados Unidos devem produzir entre 170.000 e 1 milhão de toneladas de resíduos. Como líder em resíduos PV na América Latina, o Brasil prevê volumes entre 2.500 e 8.500 toneladas em

2030. Em 2050, a quantidade desses resíduos aumentará consideravelmente. Os Estados Unidos devem acumular entre 7,5 e 10 milhões de toneladas, enquanto o Japão deve acumular entre 6,5 e 7,5 milhões de toneladas. No Brasil, prevê-se uma acumulação de 300.000 toneladas em caso de perda regular e 750.000 toneladas em caso de perda antecipada. Esses dados estão destacados na Tabela 2 (Weckend et al., 2016).

Tabela 4 – Projeção de Volume de Resíduos de Painéis Fotovoltaicos em toneladas (t) e Oportunidades de Mercado.

Ano	País	Perda Regular	Perda Precoce
2030	China	200.000	1.500.000
	Japão	200.000	1.000.000
	EUA	170.000	1.000.000
	Brasil	2.500	8.500
2050	China	13.500.000	19.900.000
	Japão	6.500.000	7.600.000
	EUA	7.500.000	10.000.000
	Brasil	300.000	750.000

Fonte: elaboração própria com base nos dados de Weckend et al. (2016)

3.2. Principais players envolvidos na cadeia de reciclagem

O Brasil está avançando na sua cadeia de reciclagem de módulos fotovoltaicos, e vários participantes já estão se preparando para entrar neste mercado em ascensão. Os produtores de painéis solares, tanto globais quanto nacionais, estão iniciando a implementação de políticas de reciclagem, com o objetivo de diminuir seu impacto ambiental e se adequar a futuras normas (Santos & Oliveira, 2021). Ademais, companhias que já trabalham com a reciclagem de eletrônicos e metais estão investigando a possibilidade de ampliar suas atividades para abranger a instalação de módulos fotovoltaicos, utilizando suas instalações e tecnologias já existentes (Carvalho et al., 2020).

Um componente fundamental para a expansão dessa cadeia é a logística reversa. Com a aplicação de normas apropriadas, companhias de logística especializadas desempenham um papel crucial na recolha e transporte de módulos descartados, algo semelhante ao que já acontece com resíduos de eletroeletrônicos (BRASIL, 2010). Também é promissor o surgimento de startups voltadas para soluções de economia circular, uma vez que podem criar tecnologias inovadoras e processos para uma reciclagem eficaz dos módulos

(Gonçalves & Silva, 2023). Ademais, universidades e instituições de pesquisa estão trabalhando em conjunto com o setor privado para criar tecnologias que permitam a recuperação de materiais valiosos, como silício e prata, fundamentais para a viabilidade financeira da reciclagem (Pereira et al., 2022).

3.3. Comparação com o mercado internacional

Em relação ao mercado global, o Brasil apresenta um atraso considerável no estabelecimento de uma infraestrutura sólida para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Na Europa, nações como Alemanha e França já estabeleceram normas específicas exigindo que os produtores de painéis solares financiem a reciclagem de seus produtos ao término de sua vida útil. A Diretiva WEEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) da União Europeia ilustra claramente como a legislação pode estimular a reciclagem de módulos fotovoltaicos, definindo obrigações explícitas para os produtores. (European Commission, 2019). Nos Estados Unidos, o setor de reciclagem está começando a se fortalecer, com alguns estados implementando leis que requerem a administração de resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos. Companhias como a First Solar, uma das líderes mundiais na fabricação de painéis solares, já estabeleceram programas de reciclagem sólidos, evidenciando a viabilidade econômica e ecológica dessa ação. (First Solar, 2021).

No entanto, nações como a China, a maior produtora global de módulos fotovoltaicos, ainda estão em estágios iniciais de implementação de políticas de reciclagem, mesmo com a vasta produção e instalação de painéis. Contudo, o governo da China está iniciando a elaboração de políticas para a gestão de resíduos fotovoltaicos, reconhecendo a relevância da administração sustentável desses materiais (Zhang et al., 2022). O Brasil se distingue desses mercados mais desenvolvidos pela ausência de uma regulamentação específica e de estímulos financeiros para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Ademais, no Brasil, a infraestrutura necessária para a reciclagem ainda é restrita, diferentemente de nações europeias e americanas, que já contam com instalações de reciclagem específicas para esses materiais. No entanto, essa circunstância constitui uma chance para o Brasil absorver as melhores práticas globais e criar um mercado de reciclagem competitivo e sustentável.

4. VIABILIDADE ECONÔMICA

4.1. Análise dos custos envolvidos na reciclagem de módulos

A viabilidade financeira da reciclagem de módulos fotovoltaicos é diretamente afetada pelos custos ligados ao procedimento, que mudam de acordo com a tecnologia utilizada e a dimensão da operação. Pesquisas sugerem que o aporte em tecnologias de ponta pode levar a custos operacionais reduzidos a longo prazo, pois aumentam a eficácia na recuperação de materiais valiosos, como silício e prata, encontrados nos painéis solares (Katz et al., 2021). A avaliação minuciosa dos custos é crucial para entender os obstáculos e possibilidades presentes na implementação de uma infraestrutura eficaz de reciclagem no Brasil. Com o aumento da procura por energia solar, a adoção de métodos de reciclagem apropriados pode não só atenuar os efeitos ambientais, mas também criar oportunidades econômicas relevantes, ao converter resíduos em matérias-primas valiosas para a indústria (Ribeiro e Almeida, 2023). Assim, a criação de políticas governamentais que promovam a implementação de tecnologias de reciclagem é essencial para a criação de um mercado sustentável e competitivo.

Os custos mais significativos associados à reciclagem de módulos fotovoltaicos englobam várias fases do procedimento. Inicialmente, as técnicas de reciclagem disponíveis - mecânica, térmica e química - possuem custos operacionais variados. A reciclagem mecânica, que requer menos energia e tecnologia avançada, costuma ser mais rentável, no entanto, recupera materiais de valor reduzido. Por outro lado, a reciclagem química, apesar de mais dispendiosa, possibilita a recuperação de materiais valiosos, como o silício de alta pureza, a prata e os metais preciosos. Por outro lado, o método térmico, que emprega calor para separar os elementos, apresenta custos intermediários, mas é eficiente na recuperação de vidros e metais (Li et al., 2021).

Outro aspecto relevante é o custo da energia. A reutilização de módulos fotovoltaicos demanda uma quantidade considerável de energia, principalmente nos procedimentos térmicos e químicos. A fonte de energia empregada impacta diretamente nesses custos. No Brasil, onde a maior parte da energia provém de fontes renováveis, incluindo hidrelétricas e eólicas, os gastos com energia podem ser inferiores em relação a nações que dependem majoritariamente de combustíveis fósseis (Silva et al., 2020)

O aporte financeiro em equipamentos e infraestrutura também tem um custo considerável. É preciso um equipamento especializado para desmontar, separar e processar os materiais de maneira precisa, a fim de recuperar de maneira eficaz componentes valiosos, como células solares, metais e vidro. Ademais, é crucial levar em conta os gastos com manutenção e progressos tecnológicos ao longo do tempo. (Fernandes, 2019).

A logística reversa também é outro desafio, particularmente no que se refere ao transporte e recolha dos módulos fotovoltaicos ao término de sua vida útil. A instalação de uma infraestrutura eficaz para coletar e encaminhar os módulos às instalações de reciclagem pode ter um impacto significativo nos custos totais do processo de reciclagem.

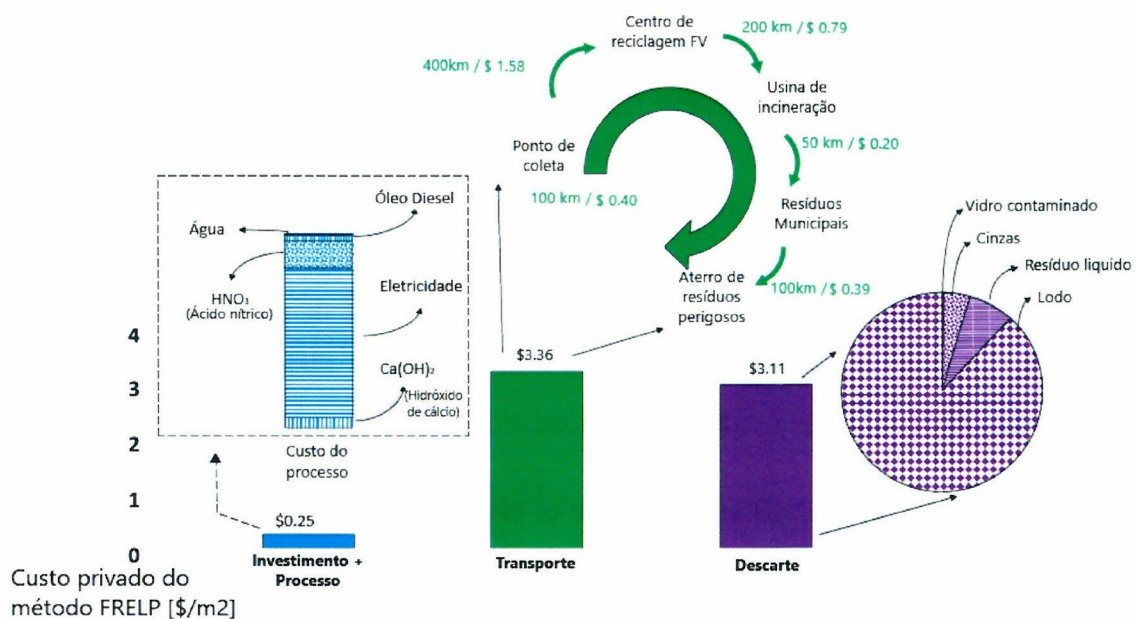
Com esses custos variados e intrincados, fica claro que a viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos depende de diversos elementos, tais como a tecnologia empregada, a eficácia da infraestrutura e a fonte de energia escolhida. No Brasil, a utilização predominante de energia renovável pode diminuir os gastos, contudo, ainda é preciso um empenho maior em inovação tecnológica, políticas públicas de estímulo e aprimoramento da logística reversa. Apenas com a harmonização desses elementos poderemos tornar a reciclagem de módulos fotovoltaicos economicamente viável e ambientalmente benéfica.

Markert et al. (2020) propõem o método FRELP (Full Recovery End of Life Photovoltaic Project) para a reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si). Este procedimento compreende um conjunto de procedimentos minuciosos destinados ao tratamento e à recuperação de componentes valiosos dos módulos fotovoltaicos, empregando métodos industriais e ecologicamente corretos, como a lixiviação ácida e a eletrólise. O procedimento envolve a separação e purificação do vidro, a queima das "células" de PV, a peneiração e a aplicação de agentes químicos para a recuperação de materiais, assegurando, assim, uma elevada taxa de recuperação de recursos.

A discussão sobre os custos de reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda é escassa no Brasil, o que dificulta uma avaliação minuciosa e específica para a situação do país. Esta pesquisa é inovadora ao adaptar estimativas de pesquisas internacionais para o cenário brasileiro, considerando o câmbio vigente do dólar. A transformação dessas referências externas tem como objetivo suprir a falta de informações sobre os custos locais, proporcionando uma perspectiva mais realista da viabilidade econômica e dos efeitos da cadeia de reciclagem no país.

A Figura 4 ilustra cada fase do transporte e o seu custo quando transportadas por um caminhão, como mencionado no método FRELP. A relação direta entre os custos de cada fase de transporte e a distância entre as instalações. De acordo com a Figura 4, as extensas distâncias entre os locais de instalação e as instalações de reciclagem de FV são os principais responsáveis pelo elevado custo do transporte de painéis de fim de vida (em média, 400 km de distância dos locais de coleta).

Figura 4 – Custo privado do método FRELP [\$/m²].



Fonte: Adaptado de Markert et al. (2020).

A avaliação do custo-benefício da técnica FRELP apresentada por Markert et al. (2020) para a reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) revela um custo total de 11,89 \$/m², conforme indicado na Tabela 5, sendo 6,72 \$/m² referentes a custos internos (financiados diretamente pela empresa) e 5,17 \$/m² referentes a custos externos (impactos ambientais e sociais). As despesas privadas incluem gastos com transporte (3,36 \$/m²), processamento que utiliza eletricidade e produtos químicos (0,25 \$/m²), além de taxas para descarte em aterros (3,11 \$/m²). Os custos externos incluem tanto as emissões quanto os resíduos produzidos, especialmente no processo de reciclagem (4,08 \$/m²) e no transporte (0,73 R\$/m²).

Tabela 5 – Tipo de Custo do processo de reciclagem. Adaptado de Markert et al. (2020).

Tipo de Custo	Subcategoria	Valor (\$/m²)
Custos Privados	Investimento e Processo	0,25
	Transporte	3,36
	Descarte em Aterro	3,11
	Total Custos Privados	6,72
Custos Externos	Processo	4,08
	Transporte	0,73
	Descarte em Aterro	0,36
	Total Custos Externos	5,17
Custo Total (Privado + Externo)		11,89

Fonte: Adaptado de Markert et al. (2020)

Assim, a reciclagem tem um custo total estimado em 11,89 \$/m², enquanto os materiais recuperados, tais como alumínio, prata, vidro, silício e cobre, proporcionam um benefício econômico estimado em 13,6 \$/m² (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2018). Esta recuperação de valor, em que o alumínio representa 46% do total, oferece um benefício líquido de 1,19 \$/m² ao levar em conta os custos ambientais, e 6,88 \$/m² ao levar em conta apenas os custos privados, o que ressalta a viabilidade da reciclagem. Este resultado sugere que, mesmo com o aumento dos gastos externos, a reciclagem continua a ser mais benéfica em comparação ao descarte.

O estudo não só evidencia um estímulo financeiro, mas também uma contribuição relevante para a sustentabilidade, ao diminuir a demanda por aterros e incentivar a reutilização de materiais. A viabilidade financeira do método FRELP pode ser melhorada através de políticas que diminuam os custos externos, consolidando a reciclagem como um método economicamente vantajoso e ecologicamente correto.

4.2. Modelos de negócios possíveis e lucratividade

A lucratividade da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil está intrinsecamente ligada à elaboração de modelos de negócios que equilibrem as despesas operacionais com o valor dos materiais reciclados e as exigências regulatórias. Ao examinar exemplos globais de reciclagem e economia circular, podemos reconhecer práticas que podem ser transpostas para o cenário brasileiro. A seguir, apresentamos alguns dos principais modelos de negócios utilizados no cenário internacional que evidenciam um elevado potencial de êxito econômico.

Organizações globais vêm implementando práticas de economia circular, onde os materiais extraídos dos módulos fotovoltaicos são reutilizados em novos ciclos de produção. Por exemplo, a União Europeia tem aplicado esse modelo de maneira sólida. A Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE Directive) determina que os produtores devem financiar a reciclagem de módulos fotovoltaicos após o seu uso, assegurando assim o retorno de materiais valiosos, tais como vidro, alumínio e silício, para a cadeia de produção. A Suíça também é notável por sua política de retorno compulsório, que exige que 90% do peso dos módulos sejam recuperados e reutilizados (CARVALHO & MORAES, 2021; MARTINS & SILVEIRA, 2020). Estes exemplos demonstram como a implementação de normas obrigatórias pode aumentar a lucratividade da reciclagem, gerando um ciclo econômico sustentável.

Em mercados como Alemanha e Japão, a colaboração entre fabricantes de módulos fotovoltaicos e empresas de reciclagem tem se mostrado eficiente para melhorar a eficiência e diminuir os gastos com a reciclagem. A First Solar, uma das líderes globais em energia solar, é um caso de sucesso de um fabricante que se envolve diretamente no processo de reciclagem. A companhia possui sua própria unidade de reciclagem, que recupera mais de 90% dos componentes dos módulos, incluindo metais preciosos como a prata. Este ciclo fechado de produção possibilita que a First Solar diminua a demanda por matérias-primas virgens e diminua o impacto no meio ambiente, enquanto obtém lucro com a venda de materiais reciclados (SANTOS & ALMEIDA, 2022; LI et al., 2021). No Brasil, essa estratégia poderia ser modificada, particularmente com a expansão do setor de energia solar, estimulando os produtores a se engajarem diretamente no processo de reciclagem.

Oferecer serviços especializados em logística reversa e reciclagem, em nações como França e Itália, surgiram companhias especializadas que proporcionam serviços completos de logística reversa e reciclagem para o segmento fotovoltaico. Tais companhias se encarregam da coleta, transporte e reciclagem de módulos, oferecendo uma solução completa para fabricantes e distribuidores. A Veolia, uma companhia francesa especializada em gestão ambiental, administra uma das maiores instalações de reciclagem de módulos fotovoltaicos da Europa, empregando métodos sofisticados de separação e processamento de materiais para assegurar a recuperação total de componentes valiosos (PINTO & GOMES, 2019). *Companhias como a Veolia demonstram que o foco na reciclagem e logística reversa pode ser*

um modelo altamente lucrativo, particularmente em um ambiente regulado e com grande procura por reciclagem de equipamentos solares.

A recuperação de subprodutos valiosos, como prata, silício de alta pureza e metais preciosos, também pode ser rentável através da reciclagem de módulos fotovoltaicos. As empresas chinesas e americanas estão à frente do setor de reciclagem de eletrônicos e resíduos solares, recuperando metais valiosos que possuem alto valor de mercado e são fundamentais para a produção de novos módulos fotovoltaicos e outros itens tecnológicos. No Japão, a NPC Incorporated emprega tecnologias de reciclagem avançadas para recuperar silício e prata de alta pureza, gerando receitas significativas e diminuindo a demanda por importação desses materiais (MARTINS & SILVEIRA, 2020). A implementação deste modelo no Brasil representaria uma chance de gerar lucros significativos, principalmente se aliada a incentivos fiscais e a uma legislação que incentive a recuperação de materiais valiosos.

Estes exemplos globais demonstram que a reciclagem de módulos fotovoltaicos pode ser uma atividade altamente lucrativa quando combinada com políticas regulatórias apropriadas, avanço tecnológico e modelos de negócios sustentáveis. No Brasil, a aplicação de modelos parecidos, juntamente com a criação de incentivos fiscais e regulatórios, tem potencial para transformar o setor de reciclagem de tecnologias solares em uma fonte relevante de lucro e sustentabilidade.

4.3. Impacto da economia circular e retornos financeiros

A adoção de uma estratégia fundamentada na economia circular na indústria fotovoltaica pode resultar em impactos financeiros consideráveis a longo prazo, fomentando um ciclo de produção e consumo sustentável. O princípio da economia circular, que busca erradicar o desperdício e reutilizar recursos, proporciona várias chances de retorno financeiro positivo, particularmente no âmbito da reciclagem de módulos fotovoltaicos.

Uma das maiores vantagens reside na diminuição dos gastos com matéria-prima. Ao reciclar materiais como vidro, alumínio e silício, as companhias reduzem a demanda por extração e processamento de novos insumos, o que pode diminuir consideravelmente os gastos na produção de módulos solares. Este modelo estabelece um ciclo econômico mais eficaz e duradouro. Por exemplo, na União Europeia, políticas de reciclagem obrigatória já geraram economias consideráveis para as empresas que a implementam, além de diminuir o impacto ambiental da fabricação de novos módulos. (CARVALHO & MORAES, 2021).

Um aspecto crucial é a apreciação dos materiais recuperados. A demanda por tecnologias sustentáveis está aumentando no mercado global para materiais como prata, cobre e silício de alta pureza. Companhias especializadas na recuperação eficaz desses materiais têm a possibilidade de obter lucros elevados, à medida que o valor de mercado dos componentes reciclados se eleva. Por exemplo, na China, a reciclagem de metais preciosos provenientes de módulos fotovoltaicos e outros detritos eletrônicos já é um negócio rentável, com companhias obtendo lucros consideráveis com essa atividade (MARTINS & SILVEIRA, 2020).

Ademais, estímulos financeiros proporcionados pelo governo podem incrementar ainda mais a lucratividade da reciclagem. Diversas nações, incluindo o Brasil, estão implementando políticas públicas para incentivar práticas sustentáveis, como a reciclagem de resíduos tecnológicos. Os governos estão oferecendo benefícios fiscais, isenções fiscais e subsídios para empresas que aplicam práticas de responsabilidade ambiental. Quando corretamente implementados, esses incentivos podem resultar em retornos financeiros significativos para as empresas que escolhem a reciclagem de módulos fotovoltaicos (PINTO & GOMES, 2019).

Outro efeito positivo da economia circular é a geração de novos postos de trabalho. A criação de uma cadeia de reciclagem no setor de energia solar pode criar novas oportunidades de emprego em setores como engenharia, logística e gestão de instalações de reciclagem. Ademais, a indústria de reciclagem tem o potencial de estimular o surgimento de startups inovadoras voltadas para soluções tecnológicas para a administração e reaproveitamento de resíduos. Nos Estados Unidos, a indústria de reciclagem de equipamentos eletrônicos e energias renováveis tem observado um aumento expressivo no número de pequenas empresas que operam neste segmento, gerando oportunidades econômicas e ecológicas (SANTOS & ALMEIDA, 2022).

Com o aumento da demanda global por soluções ecológicas e a mudança para uma economia de carbono reduzida, a implementação de um modelo de economia circular no Brasil pode ser crucial para assegurar a viabilidade financeira da reciclagem de módulos fotovoltaicos. A possibilidade de diminuir despesas, valorizar materiais e estabelecer incentivos pode não só favorecer as empresas participantes, mas também auxiliar na sustentabilidade ambiental e no crescimento econômico do país.

5. CENÁRIO POLÍTICO E REGULAÇÃO NO BRASIL

5.1. Avaliação das políticas públicas existentes

A análise das políticas públicas voltadas para a administração de resíduos sólidos no Brasil indica a falta de uma regulamentação específica para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, um segmento que cresce rapidamente no país. Apesar de existirem orientações gerais para resíduos sólidos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a reciclagem de painéis solares ainda não é abordada de forma ampla. Com a expansão acelerada da energia solar, também aumenta a necessidade de políticas governamentais que garantam o descarte e o reaproveitamento adequados dos módulos, incentivando a sustentabilidade e a economia circular.

5.1.1. Nova PL 998/2024

Atualmente, o PL 998/2024 surge como uma proposta legislativa para atender a essa necessidade. O projeto de lei propõe a criação de um marco regulatório voltado exclusivamente à gestão e reciclagem de módulos fotovoltaicos, com o intuito de evitar o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses equipamentos e fomentar um mercado de reciclagem mais robusto no Brasil.

A responsabilidade estendida do produtor é um dos elementos fundamentais do projeto. Isso implica que os fabricantes e importadores de módulos de energia solar seriam compelidos a financiar ou a estabelecer sistemas de coleta e reciclagem. Este princípio, já utilizado em outras áreas industriais, tem como objetivo assegurar que os painéis solares que estão no fim de sua vida útil sejam reciclados ou reutilizados, em vez de serem descartados em lixões.

A proposta também contempla estratégias de logística reversa, com o objetivo de assegurar que os módulos descartados sejam adequadamente encaminhados aos centros de reciclagem. É crucial estabelecer uma infraestrutura eficiente para a coleta e o transporte de módulos para garantir uma gestão adequada dos resíduos, fomentando um ciclo de reaproveitamento sustentável.

5.1.2. Método de incentivo à reciclagem

Ainda existem grandes obstáculos no Brasil para estabelecer um sistema de incentivos eficiente para a reciclagem de módulos fotovoltaicos. Embora o setor de energia

solar esteja em expansão, a ausência de um apoio financeiro apropriado restringe a habilidade das empresas de investir em tecnologias e processos de reciclagem. É crucial implementar um sistema de incentivos bem organizado para impulsionar a cadeia de reciclagem e assegurar a sustentabilidade do setor.

Os estímulos tributários são uma das táticas mais eficientes para promover a reciclagem de módulos fotovoltaicos. A diminuição de tributos, tais como o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), pode tornar o negócio de companhias que trabalham com reciclagem mais atraente. Isso não só reduz os gastos operacionais, como também pode estimular investimentos adicionais no setor. Por exemplo, companhias que aplicam tecnologia avançada na recuperação de materiais poderiam se beneficiar de um regime fiscal vantajoso, aumentando sua competitividade no mercado.

Outra alternativa seria a introdução de créditos de carbono. Conforme o mundo se esforça para diminuir as emissões de gases de efeito estufa, a reciclagem de módulos fotovoltaicos ganha cada vez mais importância. Companhias que apostam na reciclagem, contribuindo para a redução da demanda por matérias-primas virgens, poderiam ser gratificadas com créditos de carbono. Esses créditos poderiam ser negociados no mercado de carbono, oferecendo às empresas uma fonte extra de lucro. Esta estratégia não apenas contribuiria para a compensação de custos, mas também promoveria uma cultura de responsabilidade ecológica entre os produtores e recicladores.

As subvenções governamentais também têm um papel fundamental na construção de um eficiente ecossistema de reciclagem. O governo tem a capacidade de alocar fundos para a construção de infraestrutura necessária para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, tais como instalações de coleta e processamento. Ademais, o financiamento para o avanço de novas tecnologias de reutilização de materiais pode estimular inovações que melhorem a eficácia dos processos de reciclagem. Este tipo de investimento não só impulsiona a mudança para uma economia circular, como também promove o desenvolvimento econômico local ao criar postos de trabalho nos setores de engenharia, logística e tecnologia ambiental.

Portanto, é crucial estabelecer um sistema completo de incentivos financeiros para agilizar a implementação de uma cadeia de reciclagem economicamente viável no Brasil. Com o apoio apropriado, o país tem a capacidade de não só aprimorar a sustentabilidade do

setor de energia solar, como também se destacar como um pioneiro em práticas de reciclagem no âmbito global. A união de benefícios fiscais, créditos de carbono e auxílios governamentais pode estabelecer um cenário favorável para a inovação e o investimento, trazendo vantagens para a economia e o meio ambiente.

5.2. Discussão sobre a regulação do descarte e reciclagem de eletrônicos

A legislação brasileira para o descarte de resíduos eletrônicos já está bem estabelecida, principalmente por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei no 12.305/2010. A Política Nacional de Resíduos Eletrônicos (PNRS) define a responsabilidade conjunta de diversos participantes - fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e o governo - na administração dos resíduos eletrônicos, com foco na logística reversa. Este modelo é crucial para fomentar a sustentabilidade e reduzir os efeitos ambientais causados pela eliminação imprópria desses detritos.

No entanto, a legislação vigente não aborda especificamente a reciclagem de módulos fotovoltaicos, que possuem particularidades únicas em relação a outros produtos eletrônicos. Os painéis solares são feitos de diversos materiais, como vidro, alumínio, silício e metais preciosos, e essa diversidade requer uma regulamentação ajustada às suas especificidades. No momento, existem algumas falhas na regulamentação em vigor, como a ausência de objetivos concretos para o setor fotovoltaico e a escassez de infraestrutura disponível para gerir esses materiais.

Primeiramente, a falta de objetivos concretos para o setor fotovoltaico é um ponto crucial. Ao contrário dos aparelhos eletrônicos de uso pessoal, que possuem um ciclo de vida mais curto e produzem resíduos em menor quantidade, os módulos solares têm uma durabilidade superior e produzem resíduos em um nível industrial. Esta situação requer uma estratégia regulatória específica, que leve em conta não só a quantidade de resíduos, mas também as particularidades dos materiais que constituem os módulos. Estabelecer objetivos precisos para a reciclagem desses produtos pode estimular o avanço de tecnologias e procedimentos apropriados para sua recuperação.

Ademais, a infraestrutura brasileira de reciclagem é majoritariamente voltada para aparelhos eletrônicos de pequeno porte, como telefones celulares e computadores. Esta estrutura, já saturada com a demanda atual, não tem a capacidade requerida para gerir o volume e o tamanho dos módulos fotovoltaicos, que são consideravelmente maiores e

requerem métodos diferentes de coleta e reciclagem. A ausência de estruturas apropriadas para a reciclagem de módulos solares pode resultar em um crescimento no descarte impróprio e, conseqüentemente, em graves questões ambientais.

Assim, é essencial estabelecer uma legislação específica que define não só objetivos, mas também orientações e estímulos para a reciclagem de módulos solares. Esta nova normativa precisa estar em harmonia com as políticas atuais de resíduos eletrônicos, assegurando uma estratégia unificada que considere as características específicas dos módulos fotovoltaicos. Assim, o aprimoramento das normas pode criar um ambiente mais favorável para a reciclagem e o reaproveitamento de materiais, auxiliando na economia circular e na sustentabilidade do setor de energia solar no Brasil.

5.3. Sugestões para o aprimoramento da legislação

É essencial melhorar a legislação brasileira sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos para assegurar a sustentabilidade ambiental e financeira do setor solar no Brasil. A partir de experiências internacionais e das necessidades particulares do Brasil, várias propostas podem ser ressaltadas para reforçar a PL 998/2024 e outras políticas públicas correlatas.

Uma das principais propostas é estabelecer incentivos financeiros e subsídios governamentais para empresas que se dedicam à reciclagem de módulos de energia solar. Países como Alemanha e Japão estabeleceram subsídios que facilitam a viabilidade financeira do processo. No Brasil, proporcionar benefícios fiscais, linhas de crédito a taxas reduzidas e subsídios diretos para a construção de usinas de reciclagem e a compra de tecnologias avançadas pode impulsionar o mercado e impulsionar o progresso do setor.

Ademais, a lei deve estabelecer a alocação de recursos para a criação de infraestrutura de reciclagem. Isso engloba a edificação de novas instalações e a aquisição de tecnologias de ponta, como a reciclagem química e térmica, que possibilitam a recuperação de materiais valiosos, como a prata e o silício de elevada pureza. Parcerias entre o setor público e privado (PPPs) podem ser estimuladas para auxiliar no financiamento e na ampliação dessa infraestrutura em diversas áreas do país.

Outra sugestão relevante é estabelecer objetivos de reciclagem progressivos para os componentes dos módulos fotovoltaicos. Esses objetivos precisam ser definidos de maneira

realista, porém ambiciosa, e revisados regularmente para espelhar o progresso tecnológico e a expansão da capacidade de reciclagem no país. Isso pode contribuir para estabelecer um cenário regulatório que promova a inovação e o avanço de novas tecnologias de reciclagem.

Para assegurar a aderência às metas e orientações de reciclagem, é imprescindível um sistema de supervisão eficiente, com supervisão constante e sanções severas para os produtores, distribuidores e importadores que não aderirem às regras de descarte e reciclagem. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e outras entidades reguladoras poderiam cooperar para garantir a implementação das leis e incentivar práticas eficazes no setor.

Em última análise, a legislação relativa à reciclagem de módulos fotovoltaicos precisa ser combinada com outras políticas ambientais e climáticas, tais como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e as obrigações que o Brasil assumiu no Acordo de Paris. Esta integração possibilitará que a reutilização de módulos solares auxilie diretamente na diminuição das emissões de carbono e no progresso da economia de baixo carbono, fortalecendo o setor de energia solar como um dos alicerces da transição energética sustentável no país.

Essas propostas, se incorporadas à legislação do Brasil, podem tornar a reciclagem de módulos fotovoltaicos uma atividade economicamente viável e ambientalmente imprescindível, posicionando o Brasil em uma trajetória em sintonia com as melhores práticas mundiais e com a demanda crescente por economias circulares no segmento de energia renovável.

6. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O FUTURO

6.1. Desafios na reciclagem de resíduos fotovoltaicos no Brasil para a implementação de uma indústria forte

No Brasil, a reciclagem de módulos fotovoltaicos encontra obstáculos consideráveis que restringem a criação de uma indústria sólida. Essas dificuldades são agrupadas em três categorias principais: técnicas, econômicas e regulatórias.

6.1.1. Desafios técnicos

A reciclagem de módulos fotovoltaicos apresenta desafios técnicos complexos e requer soluções inovadoras. Um dos maiores desafios é a variedade de materiais empregados na produção desses módulos, tais como vidro, silício, alumínio e metais preciosos, que

demandam métodos de separação e recuperação específicos e sofisticados, além da falta de incentivos ou subsídios que incentivam a política de devolução e reciclagem.

A correta separação dos elementos citados acima, requer procedimentos de alta exatidão, fundamentais para recuperar materiais de valor e reduzir desperdícios. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), a recuperação de silício puro e metais raros é tecnicamente mais complexa, demandando métodos de reciclagem química e térmica que ainda não são amplamente difundidos no Brasil (AIE, 2022).

Outro obstáculo é que a ausência de tecnologia local para a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil representa um problema importante para o progresso do setor. Apesar de o país ter progredido na produção de energia solar, a falta de alternativas tecnológicas acessíveis e eficazes para a reciclagem desses módulos restringe sua habilidade de administrar os resíduos produzidos por essa indústria (Dias et al., 2022). Conforme Silva (2021), a dependência de tecnologias estrangeiras onera o processo, uma vez que envolve não só a importação de equipamentos especializados, mas também a exigência de treinamento técnico, o que limita a competitividade local.

Ademais, conforme ressaltado por Souza (2020), a ausência de estímulo à pesquisa e inovação na área de reciclagem fotovoltaica intensifica essa situação. Sem uma sólida infraestrutura tecnológica, o Brasil fica para trás de nações como Alemanha e Japão, que são pioneiras nas inovações relacionadas ao reaproveitamento de materiais nos módulos solares. Esta dependência externa pode restringir o crescimento da indústria a longo prazo, conforme o número de módulos descartados cresce (Costa, 2019).

6.1.2. Desafios econômicos

Apesar de já existirem iniciativas inovadoras, como a da SunR em Valinhos, São Paulo, focada na recuperação de vidro, alumínio e cobre, a ausência de tecnologia local no Brasil ainda impede a reciclagem de materiais de maior valor, como prata e estanho. Isso resulta na dependência do país em tecnologias estrangeiras, aumentando os custos e impedindo o crescimento da capacidade de reciclagem local (LGL SOLAR, 2020).

Embora haja ações inovadoras, como a da SunR em Valinhos, São Paulo, focada na recuperação de vidro, alumínio e cobre, a falta de tecnologia local no Brasil ainda é um entrave importante para a reciclagem de materiais de maior valor, como prata e estanho. Esta

restrição leva à dependência do país em tecnologias de fora, o que não apenas eleva os gastos operacionais, mas também restringe a expansão da capacidade de reciclagem local.

A instalação de plantas de reciclagem e a compra de equipamentos especializados são obstáculos adicionais que travam o avanço da indústria de reciclagem no Brasil. O custo para implementar essa infraestrutura pode ser considerável, tornando-se assim um obstáculo para novos projetos. Além disso, o retorno desses investimentos é previsto apenas a longo prazo, uma vez que o número de módulos descartados tende a crescer de forma gradual com o passar do tempo.

Finalmente, o valor de mercado reduzido dos materiais recuperados também é motivo de preocupação. Apesar da reciclagem de módulos fotovoltaicos possibilitar o reaproveitamento de materiais valiosos, tais como silício, vidro e alumínio, o preço de mercado desses materiais pode não ser suficiente para arcar com os gastos do processo de reutilização. Esta circunstância impacta diretamente a lucratividade das atividades de reciclagem, tornando-as menos atraentes economicamente e restringindo a expansão desta indústria emergente no Brasil.

Esses obstáculos destacam a importância do avanço tecnológico, suporte financeiro e estabelecimento de políticas públicas que promovam a reciclagem de módulos fotovoltaicos, assegurando um futuro mais sustentável e economicamente viável para a indústria de energia solar no país.

6.1.3. Desafios regulatórios

Os obstáculos regulamentares para a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil são variados e evidenciam a demanda por uma estratégia mais sólida e específica para gerir as especificidades deste setor. Um dos maiores obstáculos é a falta de uma regulamentação específica. Apesar de existirem orientações gerais sobre resíduos sólidos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a reciclagem de módulos fotovoltaicos não é tratada de maneira completa. Esta brecha na legislação dificulta a criação de métodos eficazes e apropriados para a administração desses resíduos.

Outro obstáculo importante é a ausência de metas tangíveis. A legislação vigente não define objetivos concretos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, restringindo, assim, o estímulo à pesquisa e ao avanço de tecnologias e procedimentos destinados à recuperação

eficaz dos materiais contidos nesses módulos. Ademais, a infraestrutura disponível para reciclagem é majoritariamente direcionada para aparelhos eletrônicos de pequeno porte. Dado o tamanho e complexidade dos módulos fotovoltaicos, a ausência de estruturas adequadas para sua coleta e processamento pode levar a um descarte impróprio e intensificar os problemas ambientais relacionados.

A falta de estímulos financeiros também é uma barreira crucial. As empresas enfrentam desafios para operar de forma economicamente viável sem subsídios, incentivos fiscais ou linhas de crédito que simplifiquem os investimentos em tecnologias de reciclagem. Apesar da proposta de lei PL 998/2024 incluir a responsabilidade adicional do produtor, a aplicação dessa obrigação ainda encontra obstáculos. Desenvolver sistemas eficazes de coleta e reciclagem exige a cooperação entre fabricantes, distribuidores e o governo, algo que pode ser complicado no cenário regulatório atual, que não é claro.

Ademais, a ausência de estratégias claras de logística reversa para o recolhimento e transporte de módulos fotovoltaicos descartados dificulta a formação de um ciclo sustentável de reaproveitamento. Uma infraestrutura logística insuficiente pode complicar o transporte dos resíduos até os centros de reciclagem, levando a um maior descarte impróprio. Outro obstáculo é a diversidade de materiais que compõem os módulos fotovoltaicos. Como esses módulos são feitos de diversos materiais, tais como vidro, alumínio, silício e metais preciosos, a ausência de uma regulamentação que leve em conta essa diversidade complica a execução de processos de reciclagem seguros e eficientes.

O desafio adicional reside na necessidade de harmonizar a legislação sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos com outras políticas ambientais e climáticas. A ausência de integração pode levar a esforços descoordenados e ineficientes, complicando a execução de uma estratégia unificada para a administração desses resíduos. Estes obstáculos regulatórios ressaltam a necessidade urgente de um quadro legal mais específico e ajustado às demandas do setor de energia solar no Brasil. Isso é crucial para incentivar a reciclagem de módulos fotovoltaicos e assegurar a sustentabilidade ambiental e o crescimento econômico do setor.

6.2. Oportunidades para inovação e crescimento no setor

O mercado brasileiro de reciclagem de módulos fotovoltaicos oferece várias chances para inovação e expansão, particularmente em um contexto mundial que cada vez mais preza pela sustentabilidade e a economia circular. Uma das principais possibilidades reside na

criação de tecnologias eficazes para reciclagem. Investir em pesquisa e inovação pode resultar no desenvolvimento de técnicas mais eficientes e econômicas para a separação e recuperação de materiais valiosos, como silício, alumínio e metais preciosos. O Brasil pode tirar proveito de alianças estratégicas com universidades, institutos de pesquisa e corporações globais, promovendo a disseminação de conhecimento e a aplicação de inovações tecnológicas que satisfaçam as demandas particulares do mercado local.

Ademais, a procura por métodos de reciclagem mais sustentáveis representa uma excelente oportunidade para o setor industrial. Tecnologias que consomem menos energia e produzem menos resíduos durante a reciclagem não só diminuem os gastos operacionais, como também elevam a relevância ecológica das atividades de reciclagem. Com o aumento da consciência ambiental de consumidores e investidores, a implementação de práticas sustentáveis torna-se um fator de vantagem competitiva. Companhias notáveis por suas ações ecológicas têm a possibilidade de ganhar uma parcela maior do mercado e atrair investimentos que procuram aderir a princípios de responsabilidade social e ambiental.

Conforme a procura por energia solar persiste em aumentar, a demanda por soluções para o descarte e reaproveitamento de módulos fotovoltaicos se tornará ainda mais urgente. Isso gera um mercado em expansão para empresas que se dedicam à reciclagem, proporcionando uma chance de expansão econômica e criação de postos de trabalho. A consolidação da cadeia de reciclagem não apenas favorece a sustentabilidade ambiental, mas também gera um ciclo econômico vantajoso para todos os participantes, desde os produtores até os usuários finais.

6.3. Viabilizar a fabricação de módulos nacionais

Uma grande oportunidade no mercado brasileiro de energia solar fotovoltaica reside na possibilidade de produção de módulos nacionais. No momento, a maioria dos módulos instalados no Brasil é importada, sobretudo da China, que lidera o mercado mundial de fabricação de módulos solares (FERREIRA et al., 2023). A criação de uma cadeia de produção local proporcionaria várias vantagens.

A possibilidade de produção de módulos fotovoltaicos no Brasil surge como uma oportunidade relevante em um mercado predominantemente importador. Em particular, a China, que detém 90% da cadeia de extração e processamento de silício, responde por 79% da produção global desse material, 97% dos wafers, 85% das células fotovoltaicas e 75% dos

módulos fotovoltaicos globais (GUO et al., 2021; IEA, 2022). Este contexto destaca a dependência do Brasil em relação a fornecedores estrangeiros, que pode ser atenuada através do desenvolvimento de uma cadeia de produção local.

A produção local de módulos pode proporcionar várias vantagens. Em primeiro lugar, a diminuição de custos é essencial, pois a produção local reduziria despesas ligadas à importação, como taxas alfandegárias e despesas logísticas. Isso facilitaria o acesso aos sistemas solares e promoveria sua adoção em larga escala. Ademais, a autonomia tecnológica asseguraria maior estabilidade no fornecimento em períodos de crise mundial, uma vez que o Brasil poderia diminuir sua dependência de fornecedores estrangeiros.

Outro aspecto importante é a possibilidade de integrar práticas de economia circular na fabricação de novos módulos, utilizando materiais reciclados. Com uma indústria de reciclagem em operação, o Brasil não apenas diminuiria o impacto ambiental, mas também criaria uma vantagem competitiva em um mercado cada vez mais voltado para a sustentabilidade. Dessa forma, a combinação da fabricação de módulos nacionais com uma infraestrutura robusta de reciclagem poderia estabelecer uma cadeia produtiva completa, desde a extração de matérias-primas até o reaproveitamento de módulos descartados. Este ciclo fechado promoveria a criação de novos negócios e atração de investimentos para o setor, beneficiando a economia local e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

7. CONCLUSÃO

A reciclagem de módulos fotovoltaicos é crucial para a sustentabilidade da indústria solar, particularmente no Brasil, onde o setor está em franco crescimento e necessita de soluções inovadoras para o descarte consciente de resíduos. Este estudo evidenciou que, apesar do Brasil possuir um grande potencial para se estabelecer como líder regional e mundial em soluções sustentáveis para a energia solar, ainda existem obstáculos consideráveis a serem vencidos, como a dependência de tecnologias estrangeiras e a ausência de políticas de incentivo específicas.

A análise econômica indicou que a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil pode se tornar uma realidade através de um esforço coletivo em inovação e políticas públicas. A implementação de tecnologias locais de reciclagem não apenas diminui os gastos de produção, mas também fomenta uma economia circular, na qual materiais valiosos, como silício e metais raros, voltam ao ciclo de produção. Este procedimento promove uma produção

mais sustentável e acrescenta valor à indústria solar do país, aumentando sua competitividade e atraindo investimentos.

Contudo, a ausência de pesquisas aprofundadas e atualizadas sobre os custos de produção e as particularidades da reciclagem no Brasil representa um obstáculo significativo para o crescimento do setor. A falta de dados restringe a elaboração de modelos empresariais e a elaboração de políticas públicas mais eficientes, tornando mais desafiador a construção de uma infraestrutura apropriada para a reciclagem de módulos. Portanto, é crucial que a comunidade acadêmica e as entidades governamentais deem prioridade a estudos focados nesses aspectos econômicos e tecnológicos da reciclagem fotovoltaica, com o objetivo de suprir as lacunas de conhecimento e estabelecer um alicerce robusto para o progresso da indústria.

Finalmente, com políticas governamentais favoráveis e suporte financeiro, o Brasil poderia criar uma estrutura regulatória sólida, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e as necessidades da indústria, fomentando a construção de uma infraestrutura de logística reversa. Este progresso transformaria o Brasil em um modelo de economia circular voltada para a energia solar, consolidando sua posição no contexto mundial como uma nação dedicada ao progresso sustentável.

Assim, a energia solar no Brasil pode se estabelecer não apenas como uma alternativa de energia renovável e de baixo custo, mas também como um marco em inovação tecnológica e sustentabilidade ecológica. Com uma indústria de reciclagem bem organizada, o país estaria apto a suprir a demanda crescente por energia renovável, favorecendo um ambiente mais saudável e criando oportunidades econômicas para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **ABAL - Associação Brasileira do Alumínio**. Disponível em: <<https://abal.org.br/reciclagem/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

Anais congresso brasileiro de energia solar - CBENS. Associação Brasileira de Energia Solar. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.59627/cbens.2020.1026>>

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ARYAN, V.; FONT-BRUCART, M.; MAGA, D. **A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 26, p. 443–459, abr. 2018.

BIOIS. **STUDY ON PHOTOVOLTAIC PANELS SUPPLEMENTING THE IMPACT ASSESSMENT FOR A RECAST OF THE WEEE DIRECTIVE** European Commission DG ENV. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/weee/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 6 out. 2024.

BRUTON, T. **Re-cycling of high value, high energy content components of silicon PV modules**. 1994.

CARVALHO, A. P.; MORAES, P. B. **A economia circular no setor fotovoltaico: Oportunidades e desafios para a sustentabilidade**. Journal of Renewable Energy, v. 45, n. 2, p. 89-101, 2021.

CARVALHO, M.; SILVA, J. L.; PEREIRA, R. **Expansão da reciclagem de eletrônicos no Brasil: uma análise setorial**. Revista de Gestão Ambiental, v. 15, n. 2, p. 123-138, 2020.

CHOWDHURY, MD. S. et al. **An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling**. Energy Strategy Reviews, v. 27, n. 27, p. 100431, jan. 2020.

CORREIA, R. **Reciclagem de painéis solares fotovoltaicos: técnicas e desafios para recuperar o silício - INEGI**. Disponível em: <<https://www.inegi.pt/pt/noticias/reciclagem-de-painéis-solares-fotovoltaicos-tecnicas-e-desafios-para-recuperar-o-silicio/>>. Acesso em: 4 out. 2024.

COSTA, P. **O cenário da reciclagem de módulos solares no Brasil**. Revista de Energias Renováveis, v. 12, n. 3, p. 45-59, 2019.

DEGRAAFF, D.; LACERDA, R.; CAMPEAU, Z. **Degradation Mechanisms in Si Module Technologies Observed in the Field; Their Analysis and Statistics**. Disponível em: <<https://www.irishellas.com/files/Degradation-Mechanisms-in-Si-Module.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2024.

DIAS, M. F.; SILVA, J. R.; LOPES, A. **O desafio da reciclagem de resíduos fotovoltaicos no Brasil**. Journal of Solar Energy, v. 15, n. 2, p. 112-130, 2022.

DOI, T. et al. **Experimental study on PV module recycling with organic solvent method**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 67, n. 1-4, p. 397–403, mar. 2001.

EUROPEAN COMMISSION. **Waste electronic equipment - Environment - European Commission**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm>. Acesso em: 6 out. 2024.

FERNANDES, A. **Reciclagem de resíduos eletrônicos no Brasil: desafios e perspectivas**. São Paulo: Editora Técnica, 2019.

FERREIRA, A. L. et al. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA AMAZÔNIA LEGAL: AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE UNIVERSALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E LOGÍSTICA REVERSA**. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/IEMA_Universalizacao_Amazonia20230427.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

FIANDRA, V. et al. **Silicon photovoltaic modules at end-of-life**: Removal of polymeric layers and separation of materials. *Waste Management*, v. 87, p. 97–107, mar. 2019.

FICHTER, K.; DORR, A. **Circular economy and solar energy**: opportunities and challenges in photovoltaic recycling. *Journal of Sustainable Development*, v. 14, n. 1, p. 112-126, 2022.

FIRST SOLAR. **Sustainability Report 2024**. Disponível em: <https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/FirstSolar_Sustainability-Report_2024.ashx>. Acesso em: 6 out. 2024.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. **Environmental benefits of photovoltaics**. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2560-2566, 2008.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. **Photovoltaic solar energy**: life cycle analysis and environmental impact. Springer, 2009.

FTHENAKIS, V. **Solar Cells**: Energy Payback Times and Environmental Issues. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, p. 9432–9448, 2012.

GONÇALVES, P. R.; SILVA, A. C. **Startups e inovação na economia circular: o caso da reciclagem de painéis solares no Brasil**. *Revista de Inovação Tecnológica*, v. 18, n. 4, p. 87-103, 2023.

GUO, J. et al. **An overview of the comprehensive utilization of silicon-based solid waste related to PV industry**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105450, jun. 2021.

IEA. **Special report on solar PV global supply chains**. [s.l.] OECD, 2022.

IRENA. **Statistics Time Series**. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>>. Acesso em: 5 out. 2024.

JOUBERT, A. et al. **Life cycle assessment of aluminium and its applications**. *Journal of Cleaner Production*, v. 50, p. 170-177, 2013.

KADRO, J. M.; HAGFELDT, A. **The end-of-life of perovskite PV**. Joule, v. 1, p. 29–46, set. 2017.

KATZ, L.; GARCÍA, M.; PEREZ, A. **Economic Analysis of Photovoltaic Module Recycling Technologies**. Journal of Cleaner Production, v. 289, p. 125218, 2021.

KLEIN, L. C. et al. **Lifecycle assessment of photovoltaic technologies**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 203, p. 110129, 2020.

KÖNTGES, M. et al. **Review of Failures of Photovoltaic Modules**. Disponível em: <http://repository.supsi.ch/9645/1/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

LATUNUSSA, C. E. L. et al. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 156, p. 101–111, nov. 2016.

LGL SOLAR. **Reciclagem de materiais fotovoltaicos no Brasil**. Disponível em: <<https://lgl solar.com.br/reciclagem-de-materiais-fotovoltaicos-no-brasil/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

LI, J.; ZHANG, X.; WANG, Y. **Recycling of photovoltaic waste: Economic and environmental impacts**. Journal of Cleaner Production, v. 289, p. 125-134, 2021.

MARTINS, J. P.; SILVEIRA, R. **Oportunidades de negócios na reciclagem de tecnologias solares no Brasil**. Revista de Gestão Sustentável, v. 10, n. 1, p. 97-110, 2020.

MARKERT, E.; CELIK, I.; APUL, D. **Private and externality costs and benefits of recycling crystalline silicon (c-Si) photovoltaic panels**. Energies, v. 13, n. 14, p. 3650, 2020.

MASSON, G.; KAIZUKA, I. **Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS 2021 PVPS REPORT IEA PVPS T1-41 : 2021 PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS TECHNOLOGY COLLABORATION PROGRAMME**. Disponível em:

<<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-4.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2024.

OLIVEIRA, F. R.; SANTOS, P. M. **Estudo de viabilidade para retrofit de usinas solares no Brasil**: análise econômica e tecnológica. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 15, n. 3, p. 67-78, 2022.

Padlewski, S., 2014. **DEC-Selecting-Right-BOM-for-Solar-Modules**, Dupont. Dupont. Disponível em: <www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/assets/DEC-Selecting-Right-BOM-for-Solar-Modules.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

PAGNANELLI, F. et al. **Physical and chemical treatment of end of life panels**: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. Waste Management, v. 59, p. 422–431, jan. 2017.

PINTO, L. A.; GOMES, D. S. **O impacto da logística reversa na reciclagem de módulos fotovoltaicos**. Gestão de Resíduos Tecnológicos, v. 12, n. 4, p. 145-160, 2019.

RIBEIRO, F.; ALMEIDA, R. **Oportunidades econômicas na reciclagem de módulos fotovoltaicos**: uma análise para o Brasil. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 16, n. 2, p. 97-110, 2023.

SANTOS, P. M.; OLIVEIRA, F. R. **Políticas de reciclagem e sustentabilidade no setor solar**: um estudo de caso no Brasil. Cadernos de Energia Renovável, v. 11, n. 1, p. 45-62, 2021.

SANTOS, P. R.; ALMEIDA, F. **Viabilidade econômica da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil**. Estudos em Sustentabilidade Energética, v. 15, n. 2, p. 97-110, 2022.

SCOLLA, M. **Avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia fotovoltaica: uma análise sob a ótica de fatores ambientais**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

SILVA, J. R. **Impactos da tecnologia importada na reciclagem fotovoltaica.** Revista Brasileira de Energia Sustentável, v. 8, n. 1, p. 67-83, 2021.

SILVA, P. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino: separação e concentração de materiais.** Ufrgs.br, 2021.

SILVA, T. M.; COSTA, V. L. **A matriz energética brasileira e seus impactos na reciclagem de tecnologias renováveis.** Energias Renováveis, v. 10, n. 1, p. 52-67, 2020.

SILVEIRA, N. S.; URBANETZ JUNIOR, J. **Cadeia de valor na reciclagem de módulos fotovoltaicos.** In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2022, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

SOUZA, F. B. **Inovação e reciclagem de módulos fotovoltaicos: Desafios para o Brasil.** Revista de Desenvolvimento Tecnológico, v. 7, n. 4, p. 31-50, 2020.

STRACHALA, D. et al. **Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction.** Acta Montanistica Slovaca, v. 22, p. 257–269, 2017.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Commodity Statistics and Information.** Reston, VA: USGS, 2018.

VASTAV, Betha Karthik Sri; NEMA, Savita; SWARNKAR, Pankaj; RAJESH, Dopplapudi. **Automatic Solar Tracking System using DELTA PLC.** Department of Electrical Engineering, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal (M.P.), India, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/316906193_Automatic_solar_tracking_system_using_DELTA_PLC> . Acesso em: 5 out. 2024.

Vodermeyer, C. **Photovoltaics Long Term Reliability and Typical Error Patterns.** Allianz Global Corporate & Specialty Expert Days. 2013. Disponível em: <www.agcs.allianz.com/assets/Global%20offices%20assets/Germany/Expert%20Days%202013/11%20Vodermeyer_Photovoltaics%20Reliability.pdf> . Acesso em: 5 out. 2024.

WANG, W.; FTHENAKIS, V. **Kinetics study on separation of cadmium from tellurium in acidic solution media using ion-exchange resins.** Journal of Hazardous Materials, v. 125, n. 1-3, p. 80–88, out. 2005.

WECKEND, S.; WADE, A.; HEATH, G. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels.** Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPV_PS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

ZHANG, L.; LIU, J.; WANG, Y. **Policy Development for Solar Photovoltaic Waste Management in China: Current Status and Challenges.** Renewable Energy, v. 185, p. 1016-1025, 2022.