Universidade Federal Rural do Semi-árido
Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica
ISSN 2763-5325 | DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325

Artigo

Descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil: logística reversa e crescimento do setor

Emylle Cristine Alves e Silva [1] e Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella [2]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; emylle.silva@alunos.ufersa.edu.br
[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 21/05/2025;
Aceito: 19/11/2025;
Publicado: 22/12/2025.

Resumo: O crescimento da energia solar fotovoltaica é nítida em diversas pesquisas e levantamentos energéticos. Em paralelo a isto, vem sendo discutido o descarte dos módulos fotovoltaicos presentes nos sistemas e quais as consequências do fim de sua vida útil. Desse modo, estudos sobre a gestão de resíduos fotovoltaicos mostram a opção da reciclagem dos módulos para recuperação de mais de 90% do seu material e reutilizá-lo. Logo, o referido artigo tem como objetivo identificar e avaliar o cenário da energia solar fotovoltaica no Brasil, desde as políticas praticadas atualmente no setor; a importância da logística reversa no descarte dos módulos FV (fotovoltaicos) e, por fim, realizar uma estimativa média de descarte de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, mediante legislação vigente. Para isso, a metodologia foi baseada em uma revisão na literatura acerca do panorama atual da energia fotovoltaica no país, em conjunto com o crescimento do setor e a legislação em vigor para o descarte correto dos módulos fotovoltaicos. Na sequência, foi analisada uma estimativa dos módulos a serem descartados mediante o crescimento do setor a partir de 2018, conforme a potência instalada dos respectivos anos em estudo. Por fim, foi apontada a necessidade em ter uma legislação voltada para logística reversa dos módulos FV, mediante a estimativa encontrada dos módulos fotovoltaicos a serem despresados ao final de sua vida útil.

Palavras-chave: resíduos fotovoltaicos; reciclagem; logística reversa.

Disposal of photovoltaic modules in Brazil: reverse logistics and sector growth

Abstract: The growth of photovoltaic solar energy is clear in various research and energy surveys. In parallel to this, the disposal of photovoltaic modules present in the systems and the consequences of the end of their useful life have been discussed. Therefore, studies on photovoltaic waste management show the option of recycling modules to recover more than 90% of their material and reuse it. Therefore, this article aims to identify and evaluate the scenario of photovoltaic solar energy in Brazil, from the policies currently practiced in the sector; the importance of reverse logistics in the disposal of PV (photovoltaic) modules and, finally, carrying out an average estimate of the disposal of photovoltaic modules at the end of their useful life, according to current legislation. For this, the methodology was based on a literature review about the current panorama of photovoltaic energy in the country, together with the growth of the sector and the legislation in force for the correct disposal of photovoltaic modules. Subsequently, an estimate of the modules to be discarded due to the growth of the sector from 2018 onwards was analyzed, according to the installed power of the respective years under study. Finally, the need to have legislation focused on the reverse logistics of PV modules was highlighted, based on the estimated number of photovoltaic modules to be removed at the end of their useful life.

Key-words: photovoltaic waste; recycling; reverse logistic.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente, 50% de sua matriz energética é voltada em recursos hídricos para geração de energia elétrica [1]. Mesmo que uma notória porcentagem de sua matriz seja proveniente de uma fonte renovável, é preciso uma maior diversificação evitando assim um comprometimento do seu desenvolvimento em função, por exemplo, da escassez de chuvas.

Sendo assim, o país passou a investir maciçamente em fontes de energia mais limpas e menos invasivas ao meio ambiente, dentre estas, encontra-se a que será destacada no presente artigo, no caso, o aproveitamento da energia solar. Segundo dados de [2], a energia solar fotovoltaica já ultrapassou a faixa dos 35 GW de capacidade instalada no Brasil, entre sistemas de geração centralizada, ou seja, as unidades de grande porte, e assim como na geração distribuída, as usinas instaladas em residências, comércio, indústria e outros.

Vale destacar que a energia solar FV [2] cresce exponencialmente, representando um total de 35 GW de energia instalada em território brasileiro, onde 24 GW representa a capacidade instalada de geração distribuída, sendo liderada pela classe de consumo residencial, representando 11,8 GW, em sequência as classes comercial, rural e industrial, com 6,9 GW, 3,5 GW e 1,7 GW, respectivamente. Como também, a geração centralizada atinge 10,68 GW de capacidade instalada, com seus principais empreendimentos no estado de Minas Gerais, 3,5 GW e na região Nordeste, 4,67 GW.

Como observado, o desenvolvimento da energia solar cresce em rítmo acelerado. Sendo assim, o descarte dos módulos fotovoltaicos acaba não sendo proporcional a sua instalação, onde as políticas públicas refentes ao seu descarte são prematuras. Neste contexto, é importante mencionar que o descarte indevido dos módulos fotovoltaicos pode levar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, como também a morte da fauna e flora por toxicidade, visto que são os metais causadores do maior impacto ambiental.

Diante o exposto, como alternativa para sanar um possível dano ambiental, a reciclagem dos módulos FV é tida como uma solução. Sendo assim, é essencial que haja uma discussão acerca da logística reversa dos módulos fotovoltaicos para os cenários atuais e futuros.

O referido artigo tem como objetivo identificar e avaliar o cenário da energia solar fotovoltaica no Brasil, desde as políticas praticadas atualmente no setor; a importância da logística reversa no descarte dos módulos FV e, por fim, realizar uma estimativa média de descarte de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, mediante legislação vigente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção mostra o panorama atual do uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, tanto para os sistemas distribuídos quanto para os sistemas centralizados. Tais informações são relevantes e contextualizam a temática aqui estudada.

2.1. Setor fotovoltaico no Brasil

De acordo com [3], conforme o Relatório de Status Global Renovável – REN21, em 2021, houve um aumento significativo de 27% em investimentos em energias renováveis em território nacional. Esse aumento superou o registrado durante o auge dos investimentos em biocombustíveis em 2008. Especificamente, o investimento em energia solar foi impulsionado, em parte, pelas baixas taxas de juros decorrentes da pandemia de COVID-19 e pelos preços elevados da eletricidade devido à pior seca em quase um século.

Por conta de sua posição geográfica, o país desfruta de elevados índices de incidência de radiação solar, os quais são uniformemente distribuídos em todo território nacional. Esse cenário possibilita o desenvolvimento de projetos viáveis em diversas regiões, transformando a energia solar, através de sistemas fotovoltaicos, uma alternativa competitiva para o fornecimento de energia [3]. Além disso, essa fonte energética pode colaborar com os compromissos nacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa.

2.1.1. Sistemas fotovoltaicos distribuídos

A geração distribuída (GD) se tornou um marco nos modelos de consumo, a mesma permite que os consumidores assumam um papel ativo na geração de energia, instalando sistemas fotovoltaicos em suas residências para produção de energia elétrica, suprindo sua demanda total ou parcialmente. Além disso, os consumidores podem abater o valor financeiro, do que foi gerado, em sua fatura de energia, valor este que seria pago à distribuidora de energia elétrica.

Desde 2020, a geração distribuída passou a duplicar o seu crescimento comparada à geração centralizada. No que refere a participação da energia solar fotovoltaica no Brasil, observa-se que em dezembro de 2023 a GD contava com 69% de potência instalada no país, enquanto a geração centralizada contribuia com 31% do montante.

Na Figura 1, os anos de 2009 a 2017 representam uma pequena quantidade de pontos de GD que, comparados ao crescimento atual, se tornam insignificantes. Vale ainda mencionar que somente no ano de 2012 entrou em vigor a primeira Resolução Normativa da ANEEL, nº 482, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil [4].

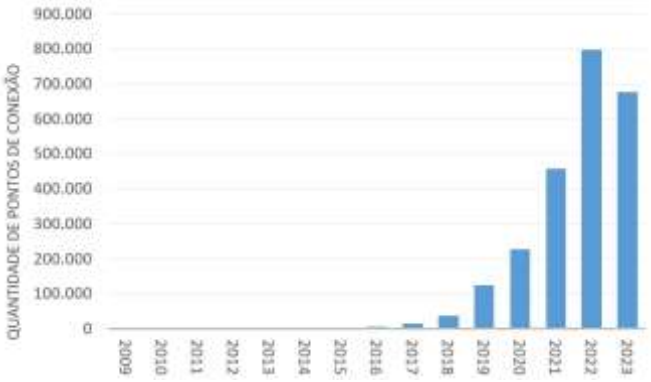


FIGURA 1. Histograma das conexões por ano. Fonte: Adaptado de [4].

A partir de 2018 as conexões passaram a serem mais relevantes, sendo de 36.329, o equivalente a 451,842 MW de potência instalada. Em sequência os anos de 2019 com 123.640 pontos, 2020 com 226.747 pontos, 2021 com 458.215 pontos, 2022 com 797.444 pontos e 2023 com 677.106 pontos, e suas potências instaladas de 1,631 GW, 2,998 GW, 4,745 GW, 8,312 GW e 8,277 GW, respectivamente. O ano atual, ou seja, 2024, não consta na Figura 1, pois a pesquisa aqui realizada encontra-se ainda no primeiro trimester do vigente ano, porém, pode-se destacar que nos primeiros três meses do ano de 2024 já há 127.029 pontos de conexão e 1,382 GW de potência instalada [4].

As distribuidoras de energia elétrica responsáveis pelos projetos fotovoltaicos em território nacional são inúmeras, sendo mais de 100 distribuidoras, que somadas correspondem a 28,041 GW de potência instalada no Brasil [5]. No *ranking* estadual, os cinco estados que lideram a potência instalada são São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso, conforme Tabela 1.

TABELA 1. Potência instalada de GD por estado. Fonte: Adaptado de [4].

Estados	***Quantidade de GD***	***Potência instalada***	***Potência instalada [%]***
São Paulo	398.601	3,862	13,78
Minas Gerais	282.283	3,712	13,24
Rio Grande do Sul	296.914	2,703	9,64
Paraná	202.772	2,646	9,43
Mato Grosso	121.142	1,708	6,09

De acordo com a Tabela 1, é possível observar que as regiões sudeste e sul do país lideram o *ranking* dos estados de maior potência instalada, onde, apenas, os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná, correspondem quase a metade da potência outorgada no Brasil.

2.1.2. Sistemas fotovoltaicos centralizados

A geração centralizada (GC) consiste na produção de energia solar em larga escala por meio de usinas de grande porte, instaladas em áreas extensas com alto índice de irradiância solar, tendo como objetivo o consumo próprio ou a venda de energia.

No Brasil, há um total de 18.248 usinas fotovoltaicas de GC em operação [5] sendo responsável por um total de 12,757 GW de potência outorgada. Considerando os estados de potência instalada mais relevantes, tem-se: Minas Gerais, Bahia, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, São Paulo e Paraíba. O *ranking* dos estados que apresentam maior potência instalada é mostrado na Tabela 2.

TABELA 2. Potência instalada de GC por estado. Fonte: Adaptado de [5].

Estado	***Número de usinas***	***Potência instalada***	***Potência instalada [%]***
Minas Gerais	121	4,205	32,98
Bahia	71	2,052	16,08
Piauí	52	1,514	11,87
Ceará	51	1,251	9,79
Rio Grande do Norte	39	1,100	8,62

Como observado na Tabela 2, diferente da Tabela 1 de GD, a região que lidera o *ranking* dos estados com maior potência instalada é a região Nordeste, correspondentes aos estados de Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, que, juntos, representam quase a metade de potência outorgada das usinas de GC em operação.

Além das usinas em operação, devem ser mencionadas as usinas em fase de construção e as que ainda não tiveram sua construção iniciada, que já se encontram outorgadas apenas aguardando a finalização e início de construção, respectivamente. Em fase de construção, encontram-se 169 usinas, distribuídas nos estados de Minas Gerais, Piauí, Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba, Bahia, São Paulo e Pernambuco, onde somadas representam uma potência outorgada de mais de 7 GW. Em contrapartida, há projetos com obras ainda não iniciadas para 2.828 usinas de GC, em 15 estados do país, estimadas em mais de 124 GW de potência [5].

3. METODOLOGIA

Considerando os dados impostos na seção dois, essa seção trata sobre a metodologia utilizada no desenvolvimento deste artigo, mostrando a gestão dos resíduos fotovoltaicos; a política nacional de resíduos sólidos; a problemática no setor fotovoltaico; e a logística reversa do setor.

Para atingir os objetivos e expor a problemática proprosta, foi realizada uma revisão da literatura acerca do panorama atual da energia fotovoltaica no Brasil, em conjunto com o crescimento do setor e a legislação em vigor para o descarte correto dos módulos fotovoltaicos. Para isto, a metodologia foi dividida em sete etapas, como mostra a Figura 2.



FIGURA 2. Etapas do trabalho. Fonte: Autoria própria.

Detalhando as etapas da pesquisa:

(1) Definição da problemática: a primeira etapa foi a definição de uma problemática futura para servir como base em toda revisão bibliográfica. A problemática foi escolhida mediante o crescimento do setor fotovoltaico e quais problemas podem acarretar para a sociedade.

(2) Busca na literatura: a segunda etapa foi voltada para buscas por artigos, pesquisas, teses, normas, decretos e demais documentos considerados relevantes para agregar na pesquisa. As fontes de pesquisas foram

bases de dados científicas como SciELO e Google Acadêmico, sites governamentais e outros repositórios de dados.

(3) Gestão dos resíduos fotovoltaicos: a terceira etapa é explicado sobre a composição dos módulos fotovoltaicos, voltado para gestão dos seus resíduos ao fim de sua vida útil.

(4) Política Nacional de Resíduos Sólidos: a quarta etapa é voltada para legislação que rege os módulos FV e materiais presentes em sua composição.

(5) Problemática no setor fotovoltaico: na quinta etapa é mostrada a consequência no descarte incorreto dos módulos em decorrência da falta de políticas específicas para o setor.

(6) Logística reversa: na sexta etapa é explicado o conceito de logística reversa, além das ferramentas para ser empregada esta logística do setor FV.

(7) Análise e síntese do problema: na sétima, e última etapa, foi realizada uma análise a partir de todos dados obtidos monstrando, nos resultados, uma estimativa dos módulos descartados ao final de sua vida útil.

3.1. Gestão dos resíduos fotovoltaicos

Atualmente, a quantidade de módulos fotovoltaicos no fim de sua vida útil, no Brasil, são relativamente irrelevantes, em função de sua vida útil em torno de 25 anos a contar do período de sua instalação. Porém, espera-se que esse número aumente significativamente em um futuro próximo, suscitando preocupações sobre uma gestão adequada.

Os principais componentes utilizados para produções do módulos fotovoltaicos convencionais são: as células fotovoltaicas (feitas de silício – Si), vidro, encapsulamento de EVA (acetato-vinilo de etileno), backsheet, caixa de junção e a moldura de alumínio [6], representada na Figura 3.

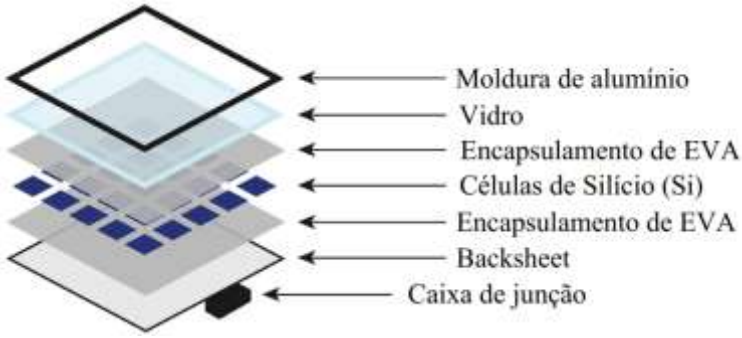


FIGURA 3. Diagrama das camadas de um módulo FV de silício convencional. Fonte: [6].

De acordo com [7], em junho de 2016, foi representada a projeção dos resíduos fotovoltaicos em vários países, no horizonte até 2050. No Brasil, foi estimado um montante aculumado de 300.000 toneladas, caso seja uma perda regular (ou seja, uma perda esperada em função da sua vida útil) dos módulos, e 750.000 toneladas, caso seja uma perda antecipada.

As principais tecnologias fotovoltaicas no mercado incluem: i) os módulos de silício (Si) cristalino de primeira geração, que detém uma boa parcela do mercado fotovoltaico; ii) as tecnologias de filme fino de segunda geração; e iii) os módulos fotovoltaicos de terceira geração [8].

Atualmente, há uma preocupação em tornar essa fonte de energia mais eficiente e econômica em comparação com as demais, entretanto os impactos após o fim da vida útil desses equipamentos nem sempre são levados em consideração. Tais impactos, que serão expostos posteriormente, continuarão a existir se não houver uma mudança no paradigma da fabricação atual, que segue em um fluxo de material linear, desde a extração até a fabricação dos produtos, uso e descarte como resíduos em aterros. Este modelo, de ciclo de material em circuito aberto, está associado à economia atual de produção e gestão de resíduos [8].

Apesar da produção de energia solar ser reconhecida como ambientalmente benigna [9], a sustentabilidade a longo prazo dependerá, principalmente, da eficácia das soluções de processamento para reciclar o grande volume de módulos solares no fim de vida, que serão gerados em breve. Os resíduos provenientes dos módulos FV estão entre os fluxos de resíduos de crescimento mais acelerado na categoria de grandes resíduos eletrônicos, também conhecido como lixo eletrônico.

3.2. Política nacional de resíduos sólidos

A lei n° 12.305/2012 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), abordando seus princípios, metas e ferramentas, além de direcionar a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, incluindo os perigosos. A lei também define as responsabilidades dos geradores e do poder público, bem como os instrumentos econômicos aplicáveis [11]. A PNRS inseriu em suas seções a definição de logística reversa e responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como meio de instrumento para sua política.

Dez anos mais tarde, em 2022, foi criado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), estabelecido pelo decreto n° 11.043, de 13 de abril de 2022, e desempenha um papel fundamental como parte da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Este documento fornece um roteiro para alcançar os objetivos e concretizar essa política, através de diretrizes, estratégias, ações e metas destinadas a aprimorar a gestão de resíduos sólidos no país [10]. Vale ressaltar que os resíduos dos módulos fotovoltaicos, tidos como lixo eletrônico, também são regidos pela PNRS, visto que os componentes presentes no módulos se enquadram como resíduos sólidos.

A responsabilidade compartilhada é estabelecida por [12] como uma divisão de funções, onde o consumidor, enquanto cidadão, é encarregado de descartar os resíduos conforme as orientações e locais determinados pelos sistemas de logística reversa. Já o setor privado assume a responsabilidade pelo gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, reintegrando-os à cadeia produtiva, adotando medidas que promovam benefícios socioambientais, utilizando os materiais de forma racional prevenindo a poluição ambiental. Por fim, o Poder Público tem o dever de fiscalizar o processo e, em conjunto com os demais responsáveis pelo sistema, conscientizar e educar os cidadãos.

3.3. Problemática no setor fotovoltaico

O impacto ambiental é descrito pela norma ABNT NBR ISO 14001 como qualquer alteração no meio ambiente, podendo ser positiva ou negativa, que ocorre total ou parcialmente devido aos aspectos ambientais de uma organização. Os aspectos ambientais referem-se aos elementos das atividades, produtos ou serviços dessa organização, que têm interações atuais com o meio ambiente [13].

Em uma pesquisa realizada pela *Green Eletron* [14], no ano de 2021, empresa especializada em logística reversa de eletrônicos, mostra que, anualmene, mais de 53 milhões de toneladas de equipamentos eletrônicos são descartados incorretamente. O Brasil ocupa o quinto lugar no *ranking* mundial e o primeiro na América Latina no descarte incorreto de eletrônicos [14]. Vale ressaltar que a pesquisa não leva em conta o descarte dos módulos FV, logo, se não forem pensados em modos e investir recursos para reciclagem e logistica reversa dos módulos, a expectativa é que esse número cresca exponencialmente.

A maior preocupação relacionada à energia solar fotovoltaica ocorre durante o descarte dos componentes desativados. Os módulos atualmente em operação contêm elementos tóxicos e contaminantes potencialmente perigosos, que, se descartados de forma inadequada, podem contaminar o solo e os lençóis freáticos [15].

Como citado em tópicos anteriores, os módulos de silício cristalino de primeira geração são os mais difundidos no mercado [8]. Entretanto, podem surgir desafios na reciclagem desses módulos, já que contêm silício, prata e pequenas quantidades de elementos como estanho e chumbo, que, juntos, representam 4% da massa. Os painéis de segunda geração, com as tecnologias de filmes finos, são compostos por mais de 98% de vidro, polímero e alumínio, classificados como resíduos não perigosos, No entanto, também contêm quantidades modestas de cobre e zinco, totalizando cerca de 2% da masssa, o que representa um potencial risco ambiental. Os mesmos também incluem semicondutores ou materiais considerados como perigosos, como índio, gálio, selênio, cádmio, telúdio e chumbo, necessitando assim de um tratamento especial [7].

Sendo assim, devido à rápida expanção do uso de tecnologias fotovoltaicas, em conjunto com o lamentável histórico de descate inadequando de materiais, especialmente os contaminantes, surge uma preocupação quanto ao desequilíbrio entre as ações prejudiciais ao meio ambiente e as que visam garantir a qualidade de vida para as gerações futuras [15].

Vale ressaltar que, de acordo com [16], a principal dificuldade relacionada à quantidade de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos é que, se não forem descartados e tratados de uma forma apropriada, podem desencadear impactos ambientais adversos ao meio ambiente e a saúde humana. Esses impactos são relacionados à lixiviação de chumbo e cádmio, à perda de recursos convencionais, como vidro e alumínio, e à escassez de metais raros, incluindo prata, índio, gálio e germânio.

Tal preocupação está presente no Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, onde é imprescindível articular com os líderes governamentais e setoriais para direcionar a regulação relativa à devida reciclagem dos componentes fotovoltaicos. O local onde se deve reciclar os componentes não apresenta desafios tecnológicos significativos, porém requer colaboração com órgãos ambientais e instituições governamentais para estabeler regulamentações de descarte que incentivem o desenvolvimento de uma cadeia industrial voltada para a logística de reciclagem de tais componentes [17].

3.4. Logística reversa

A logística reversa serve como instrumento para facilitar o recolhimento, a separação e a destinação apropriada de materiais que atingiram o final de sua vida útil, reintegrando-os à cadeia produtiva [12]. Os materiais envolvidos nesse nesse processo percorrem uma sequência de etapas, que incluem coleta, seleção, classificação e reciclagem. Possibilitando que uma variedade de itens seja reaproveitada em diversas aplicações [15].

Mediante o cenário atual do setor fotovoltaico no Brasil, o país passou a criar diversos programas e a legislação passou a se adaptar a sua evolução, de modo a incentivar o uso desta fonte de energia. O alto custo, por exemplo, era um dos principais impedimentos para obtenção de um sistema de geração solar fotovoltaica, onde a legislação atual é conforme a Lei n° 14.300/2022[1].

Mediante a tais adequações foi criado o decreto n° 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, que estabelece diretrizes para a implementação de logística reversa obrigatória para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e suas partes constituintes. Os módulos fotovoltaicos estão presentes na lista de relação dos objetos de logística reversa. Logo, torna-se obrigação dos fabricantes, fornecedores e comerciantes, disponibilizarem um ponto de coleta para os consumidores para que, posteriormente, seja feita a reciclagem dos módulos, arcando assim com toda a logística reversa. Assim, caso haja privatização de responsabilidade, o transgressor será penalizado mediante sanções previstas em lei [18].

A implementação e estruturação do decreto n° 10.240 [18] ocorrerá em duas fases. A fase I foi iniciada na data de publicação do decreto com previsão para ser finalizada dia 31 de dezembro de 2020. Esta primeira fase tem como intuito a criação do grupo de acompanhamento de performance, sendo ele formado pelas entidades que farão parte do referido sistema, desde os fabricantes nacionais até os comerciantes, onde eles devem acompanhar e divulgar a sua implementação. Além da criação do grupo, tais participantes devem demonstrar adesão às entidades gestoras do sistema, como também os órgãos governamentais, sendo eles o Ministério do Meio Ambiente e o Ibama. É instituído o mecanismo financeiro para sustentar a operação de logística reversa, onde será repassado pelas empresas através de pagamentos diretos às entidades gestoras, de tal modo que todas as fases do sistema serão contempladas, como também será destinado de um modo diferenciado para cada tipo de produto eletroeletrônico, mediante critérios técnicos e econômicos. Por fim, o grupo de acompanhamento de performace realiza a estruturação do mecanismo para realizar o monitoramento e acompanhamento do sistema pelos orgãos responsáveis.

Sendo a fase I mais voltada para a gestão das partes, a fase II [18], iniciada dia 1 de janeiro de 2021, contempla a aptidão dos prestadores de serviço dispostos a aderir o decreto, a divulgação do sistema de logística reversa para despertar o interesse em gestores municipais, demosntrando assim o seu apoio, e, finalizando, a criação de pontos de coleta. Em sua implementação, foram criadas metas anuais do percentual que será coletado anualmente, conforme Tabela 3.

TABELA 3. Cronograma para atendimento de meta percentual a ser coletada e destinada anualmente. Fonte: Adaptado de [18].

Ano	2021	2022	2023	2024	2025
Percentual	1%	3%	6%	12%	17%

Entretanto, é importante mencionar que o decreto n° 10.240 atua apenas nos módulos residenciais [18], sendo estes pertecentes apenas à geração distribuída, e não há ainda legislação em vigor que opere sobre os módulos das usinas de grande porte, ou seja, integradas na geração centralizada. Isso se torna uma preocupação agravante, tendo em vista que a geração pioneira da energia solar fotovoltaica foi a geração centralizada, levando em consideração que, a partir da Figura 1, a GD teve um início significativo em 2018, em um período onde já havia usinas de GC em operação, levando em consideração que, no ano de 2017, já havia 1 GW de capacidade instalada de geração centralizada [1]. Logo, será na GC onde os primeiros módulos irão chegar ao fim de sua vida útil. Acarretando em uma grande massa de PVs em desuso por não haver uma legislação específica para sua regulamentação.

3.4.1. Reciclagem dos módulos fotovoltaicos

[1] Legislação que instituiu o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, a "taxação do sol", como ficou popularmente conhecida, se refere à cobrança do fio B, uma tarifa paga referente às linhas de transmissão de energia da concessionária, sendo cobrado em cima da energia elétrica ativa compensada.

Como explicado e mostrado, detalhadamente, em [19], é necessário inicialmente compreender a estrutura e composição dos módulos fotovoltaicos, antes de tratar sobre a sua reciclagem. Vale salientar que cada modelo de módulo FV tem um material mais específico em sua fabricação, mas todos partem de uma base para produção, que será representado na Tabela 4.

TABELA 4. Composição geral de um modulo fotovoltaico. Fonte: Adaptado de [20].

Insumos	***Massa [%]***	***Recuperação [%]***
Vidro	74	100
Polímero	~6,5	0
Alumínio	10	100
Silício	~3	90
Cobre	0,6	100
Prata	<0,006	100
Estanho	0,12	100
Chumbo	<0,1	100

Confome [21], um módulo FV tem, em média, 23kg, e aproximadamente 97% do seu material pode ser aproveitado. Entretanto, os sistemas fotovoltaicos são conhecidos por apresentarem uma alta durabilidade, e de acordo com [22], a vida útil dos módulos FV pode chegar, em média, de 25 a 35 anos. Para os modelos de alta eficiência no mercado, essa expectativa aumenta para os 40 anos.

Todavia, não são todos módulos que cumprem com sua total utilidade, há fatores que podem acarretar a redução de vida útil, sendo eles, o incorreto manuseio dos módulos durante a instalação; o projeto mal dimensionado em suas proteções; dano durante a logística entre as importadoras até o produtor final; assim como a limpeza indevida [22].

De acordo com [21], os módulos passam por cinco etapas durante o processo de reciclagem, conforme Figura 4, e apresentam três métodos de separação. Os métodos são o mecânico, onde é destinada a trituração e separação do vidro, em sequência o químico, onde os metais pesados são separados, podendo acarretar na recuperação das células fotovoltaicas, e, por fim, o térmico, designado a remoção dos polímeros.

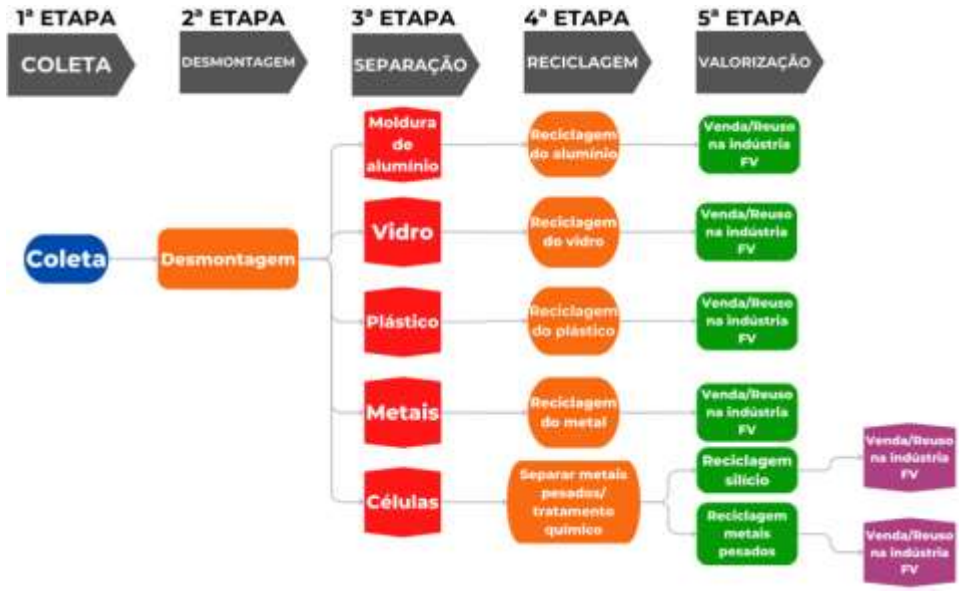


FIGURA 4. Fluxograma da reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de [21].

O estágio fundamental da reciclagem é a etapa da separação, onde os materiais recebidos passam inicialmente por uma triagem. Após essa avaliação preliminar, o processo inicia com a remoção mecânica do quadro de alumínio, conectores e caixa de junção. Posteriormente, partem para remoção do vidro e, em seguida, o restante é submetido à incineração e tratamento químico para separação dos outros metais.

Depois de coletados e separados, os materiais são enviados para compradores correspondentes, geralmente empresas especializadas em reciclagem e processamento de materiais puros. Tais empresas transformarão os materiais coletados em matérias-primas com as propriedades necessárias para atender às exigências de cada setor industrial [21].

A reciclagem do módulos fotovoltaicos ainda é pouco desenvolvida em território brasileiro, a empresa pioneira, e única, nesse segmento no Brasil é a SunR, localizada no interior de São Paulo. A empresa faz um processo intermediário da reciclagem dos módulos FV, sem o uso de processos químicos ou térmico, sendo realizados apenas procedimentos mecânicos, onde o que não é possível reciclar localmente é enviado para o exterior [23].

Comparado à outros países, onde os módulos já estão perto do fim de sua vida útil, em função dos sistemas fotovoltaicos terem sido instalados há mais de 20 anos, tem-se a União Europeia que utiliza um modelo de reciclagem bastante eficiente e pode ser empregado no Brasil. Segundo [23], no país é exigido que 75% do material utilizado no módulo FV seja reciclado, de tal modo que o custo da reciclagem está incorporado ao preço do produto no momento da compra. Isso significa que tanto os usuários quanto os empresários envolvidos nessa cadeia não percebem os custos do descarte. Vale ressaltar que é obrigação da empresa de reciclagem fazer a coleta desses materiais dos clientes.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio da literatura pesquisada e mostrada na seção 2, assim como a metodologia de pesquisa mostrada na seção 3, a presente seção trata sobre a reciclagem dos módulos fotovoltaicos e realiza uma estimativa do descarte dos módulos FV em um horizonte de 2018 a 2023.

4.1. Estimativa do descarte dos módulos fotovoltaicos

Conforme dados de [4], é possível obter o crescimento e, mais precisamente, a potência instalada a cada ano da GD no Brasil. Análogo a potência outorgada foi realizada uma estimativa da quantidade de módulos a serem descartados, levando em consideração o seu descarte natural, ou seja, o fim de sua vida útil, sendo este em torno de 25 anos.

Para isto, foi utilizada a Figura 1, presente no referido artigo, onde os anos considerados na análise foram de 2018 a 2023, pois neles há o notório crescimento da GD no país, tornando-se assim os anos de maior relevância. Para estimar a quantidade de módulos descartados, foi atribuído um determinado valor de potência dos módulos FV, sendo estas as potências de referência. Do ano de 2018 a 2019, foi empregada a potência de 370Wp e, de 2020 a 2023, foi empregada a potência de 560Wp[2]. Houve essa necessidade de atribuir uma potência padrão diferente aos respectivos intervalos de anos, mediante o crescimento do setor fotovoltaico, tendo em vista que entre os anos de 2018 e 2019, houve a transição dos módulos FV na faixa de 200Wp para os módulos de potência na faixa de 300Wp. Essa transição foi recorrente para os demais anos, onde entre os anos de 2020 a 2021, foi estabilizado os módulos FV de 560Wp no mercado. Para alcançar os resultados, previstos da Tabela 5, foi considerada a potência instalada em cada ano de análise (todos na unidade de *Watts*) e dividido pela respectiva potência do módulo, mediante intervalo determinado.

TABELA 5. Estimativa de descarte dos módulos fotovoltaicos de 2018 a 2023 no horizonte de 25 anos.
Fonte: Autoria própria.

Ano	***Potência instalada [MW]***	***Módulos descartados [milhões]***
2018	451,841	1.221.494
2019	1.631,464	4.409.081
2020	2.998,501	5.353.929
2021	4.745,573	8.472.816
2022	8.312,363	14.855.324
2023	8.277,622	14.783.233

Vale salientar que o descarte dos módulos fotovoltaicos ocorrerá após o fim de sua vida útil, ou seja, depois de 25 anos. Os resultados obtidos são referentes ao descarte dos módulos FV levando em consideração

[2] Valores estimados a partir de uma verificação realizada do mercado para os referidos anos em análise.

 DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n2.a14203.2025

a potência instalada dos anos utilizados para análise, assumindo que todos os módulos instalados, nos respectivos anos, atinjam o fim de sua vida útil na mesma média de tempo.

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o presente artigo cumpriu com o seu objetivo, a partir das análises e pesquisas realizadas de como se encontra o mercado de energia solar fotovoltaica, geração distribuída e centralizada, identificando as políticas atuais que norteiam o setor, como também a importância da logística reversa e gestão adequada de resíduos no âmbito da energia solar fotovoltaica.

Conforme a Tabela 5, é possível observar a importância e urgência em ter uma legislação mais específica para o setor fotovoltaico. Tendo como base o ano de 2018, onde, após o fim da vida útil dos módulos FV instalados no referido ano, a partir do ano de 2043 mais de 1 milhão módulos fotovoltaicos serão descartados, sem levar em consideração o descarte precoce, podendo neste ter um descarte de mais módulos FV em um período de tempo mais curto. Em contrapartida, o decreto n° 10.240, atua apenas para os módulos residênciais, ou seja, não existe legislação em vigor, nos dias atuais, que imponha um correto descarte aos milhares de módulos FV presentes nas usinas de geração centralizada, como também não há um órgão que fiscalize a gestão dos resíduos dos módulos fotovoltaicos.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos oferece vantagens ambientais significativas, como também colabora para a conservação de recursos energéticos. Esse processo promove a utilização mais eficiente dos materiais, minimizando a presença de resíduos dos módulos no meio ambiente, como a sua deposição em aterros sanitários. Vale ressaltar, que o reaproveitamento dos materiais contribui para a redução da extração de minérios, evitando assim a sua escassez.

Uma legislação rigorosa da gestão dos resíduos fotovoltaicos, construída a partir do conceito de logística reversa, é essencial para o descarte apropriado dos módulos FV, tendo a separação de todos materiais presentes nos módulos, valorizando cada parte para, posteriormente, ser reintegrado no mercado. Isso traz benefícios socioconômicos e ambientais para sociedade, atuando no aumento da geração de empregos e mão-de-obra especializada, assim como menos impactos ambientais e proporcionando a economia circular.

Por todo o exposto, sugere-se para futuros trabalhos uma pesquisa acerca da real quantidade de módulos descartados a partir de 2043, se foram equivalentes aos resulados deste trabalho, como também à existência de um novo cronograma de coleta dos módulos FV, tal qual presente na Tabela 3, referente ao decreto n° 10.240, realizando uma análise da quantidade de módulos fotovoltaicos descartados e coletados. Uma pesquisa fazendo um levantamento de dados tal qual o presente artigo, sendo levado em consideração o descarte dos módulos fotovoltaicos com defeitos e quebrados antes do fim de sua vida útil. Por fim, sugere-se também uma pesquisa aprofundada sobre a legislação que deve atuar na geração centralizada, tendo em vista que estas usinas apresentam uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos e não há lei de logística reversa atualmente atuando na mesma.

REFERÊNCIAS

[1] ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**: infográfio. Infográfio. 2024. Disponível em: https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/. Acesso em: 11 dez. 2023.

[2] ABSOLAR. **Energia solar supera 35 GW de capacidade instalada no Brasil**. 2023. Disponível em: https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-supera-35-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil/. Acesso em: 11 dez. 2023.

[3] RÖNNAU, Martina. **Cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico no Brasil: tendências de inovação**. 2023. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Gestão de Energia, Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tramandaí, 2023. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/264239. Acesso em: 06 mar. 2024.

[4] ANEEL. **Geração Distribuída**. 2024. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9&disablecdnExpiration=1692927503. Acesso em: 24 fev. 2024.

[5] ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. 2024. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. Acesso em: 28 fev. 2024.

[6] FARRELL, C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 128, p. 109911, 2020.

[7] IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
[8] BRITO, José Luiz Romero de; SANTOS, Mario Roberto dos; SHIBAO, Fabio Ytoshi. GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA. **Revista Contemporânea**, [S.L.], v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 28 set. 2023. South Florida Publishing LLC. http://dx.doi.org/10.56083/rcv3n9-136.
[9] ISLAM, Md Tasbirul *et al*. Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: a case study of new south wales councils in australia. **Waste Management & Research**: The Journal for a Sustainable Circular Economy, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 386-395, 6 out. 2020. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x20962837.
[10] SINIR. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2022. Disponível em: https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/. Acesso em: 18 fev. 2024.
[11] BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Lei N° 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 18 fev. 2024.
[12] SINIR. **O que é a logística reversa**. Disponível em: https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/. Acesso em: 18 fev. 2024.
[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015. 53 p.
[14] GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil - 2021**. 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/pesquisa. Acesso em: 17 fev. 2024.
[15] SILVA, Cristiano Cruz da; OLIVEIRA, Wemerson Franklyn Araujo de. **Gestão dos resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos**. 2022. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética, Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2022.
[16] GHIZONI, Joana Pauli. **Sistemas fotovoltaicos: Estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil**. 2016. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
[17] EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050. Acesso em: 18 fev. 2024.
[18] DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. . 31. ed. Seção 1. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096. Acesso em: 20 fev. 2024.
[19] MAIA, Antonio Gabriel Fernandes; VARELLA, Fabiana Karla de Oliveira Martins. Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, Mossoró, p. 66-76, 30 jun. 2022. Editora da Universidade Federal Rural do Semi-Arido - EdUFERSA. http://dx.doi.org/10.21708/issn27635325.
[20] SÃO PAULO. IEMA. . **Sistemas Fotovoltaicos na Amazônia Legal: Avaliação e proposição de políticas públicas de universalização de energia elétrica e logística reversa**. 2023. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/IEMA_UniversalizacaoAmazonia20230427.pdf. Acesso em: 02 ago. 2023.
[21] JOI. Energes. **Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos. É Possível?** 2020. Disponível em: https://energes.com.br/reciclagem-de-modulo-fotovoltaicos-e-possivel/. Acesso em: 20 fev. 2024.
[22] LUIZ FELLIPE CARDOSO. Lumus Engenharia Elétrica. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos**. Disponível em: https://lumusengenharia.com.br/blog/reciclagem-de-modulos-fotovoltaicos/. Acesso em: 20 fev. 2024.
[23] REY, Juan Pablo. **Reciclagem de painéis é desafio ambiental para energia solar**. 2021. Disponível em: https://projetocolabora.com.br/ods7/reciclagem-de-paineis-e-desafio-ambiental-para-energia-solar/. Acesso em: 21 fev. 2024.
[24] SILVA, E. C. A.; VARELLA, F. K. O. M. **Logística reversa no setor fotovoltaico**. 2024. 10 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024.