



PUC-SP

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO

FACULDADE DE DIREITO

DIREITO AMBIENTAL

LUCAS INGLEZ MAZZARELLA

**LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ANÁLISE DOS
IMPACTOS AMBIENTAIS E LEGAIS DA PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

SÃO PAULO

2023

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO

LUCAS INGLEZ MAZZARELLA

RA00217582

**LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ANÁLISE DOS
IMPACTOS AMBIENTAIS E LEGAIS DA PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Direito, na Faculdade de Direito
da Pontifícia Universidade Católica de São
Paulo, sob orientação do Prof. Dr. Luiz
Antônio de Souza

SÃO PAULO

2023

AGRADECIMENTOS

De início, quero agradecer à minha família, a qual tenho muita sorte e orgulho de fazer parte.

Aos meus pais, agradeço por nunca medirem esforços em prol do meu desenvolvimento e por serem o meu maior exemplo enquanto cidadãos e profissionais. Aos meus irmãos, meu muito obrigado por sempre estarem ao meu lado, compartilhando das felicidades e angústias que a vida nos proporcionou durante o nosso crescimento.

Agradeço também à Dona Nilzete, Bá, que desde sempre cuidou de mim e dos meus irmãos como se filhos fôssemos, celebrando cada conquista e nos apoiando a cada percalço que encontramos no caminho.

A todos os meus amigos, que pude compartilhar calorosos momentos ao longo da vida, obrigado!

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, com os quais tenho o prazer de dividir o dia a dia e a oportunidade de me desenvolver profissionalmente junto de pessoas com tamanho conhecimento.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para essa conquista, minha gratidão.

RESUMO

Nos últimos anos, o Brasil vem experienciando um crescimento bastante acentuado no número de unidades geradoras de energia fotovoltaica, seja para pequena produção, destinada à geração e consumo próprio de energia, seja para projetos de larga escala, pensados para gerar energia enquanto um negócio propriamente dito.

Comumente endereçada como uma fonte de energia elétrica verde, sustentável e renovável, a produção de energia solar a partir de módulos fotovoltaicos de fato não se caracteriza por ser uma fonte, que durante a sua vida útil de aproximadamente 30 anos, não emite CO₂ na atmosfera. Ocorre, todavia, que apesar do seu período produtivo ser bastante interessante quando se fala em emissão de gases nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, se faz necessário olhar para o processo produtivo das placas solares fotovoltaicas, mas principalmente, como foco deste trabalho, às políticas de descartes destas.

Conforme será demonstrado, a legislação brasileira carece de regulamentações abrangentes que tornem os processos de descarte, tal qual a logística reversa, obrigatória para painéis solares de grandes projetos, limitando-se, em sua maioria, a painéis de uso doméstico.

Existem desafios significativos na implementação de práticas de logística reversa para painéis solares, dos quais merecem destaque a complexidade do processo, que exige investimentos em tecnologias de reciclagem e separação de componentes, potencialmente afetando a eficiência e o tempo de reciclagem de cada painel.

Palavras-chaves: Direito ambiental. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Logística reversa. Painéis solares fotovoltaicos. Decreto nº 10.240/2020.

ABSTRACT

In recent years, Brazil has witnessed a significant increase regarding the deployment of photovoltaic energy systems, from small-scale installations for self-consumption to large-scale projects designed for commercial energy generation. While commonly hailed as a green, sustainable, and renewable source of electricity, it's imperative to recognize that the production of solar energy through photovoltaic modules isn't entirely devoid of environmental impact.

Over its approximate 30-year lifespan, solar panels do not emit CO₂ into the atmosphere. Nevertheless, this study places particular emphasis on scrutinizing the production process of photovoltaic solar panels, with a primary focus on their disposal policies.

As this investigation will reveal, Brazilian legislation lacks comprehensive regulations that mandate disposal processes, especially reverse logistics, for solar panels from large-scale projects, predominantly addressing panels designed for domestic use.

The implementation of reverse logistics practices for solar panels presents significant challenges, not least the intricacies of the process, which necessitate investments in recycling technologies and component separation. These complexities can potentially impact the efficiency and recycling timelines for each panel.

Keywords: Environmental law. National Solid Waste Policy. Reverse logistics. Photovoltaic solar panels. Decree No. 10.240/2020.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Gráfico de Potencial de Geração Solar Fotovoltaica

FIGURA 2 - Infográfico “Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil”

FIGURA 3 – Estimativa de resíduo solar fotovoltaico no mundo entre 2016-2050 (toneladas)

FIGURA 04 – Ranking de países com maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
1. LOGÍSTICA REVERSA: ASPECTOS GERAIS.....	12
1.1. DO DIREITO CONSTITUCIONAL AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	12
1.2. POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (LEI Nº 12.305/2010)	17
1.2.1. A GESTÃO INTEGRADA E O PRINCÍPIO DA RESPONSABILIDADE COMPARTILHADA	23
1.3. ASPECTOS LEGAIS CONCERNENTES À LOGÍSTICA REVERSA	27
1.4. MEIO AMBIENTE E PLACAS SOLARES	31
2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	36
2.1. PLACAS SOLARES COMO IMPORTANTES FONTES DE PRODUÇÃO DE ENERGIA LIMPA	36
2.1.1. CRESCIMENTO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	38
2.1.1.1. INSTALAÇÕES DE GRANDE PORTE E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	41
2.2. PRODUÇÃO DE PLACAS SOLARES	45
2.3. DESCARTE DE PLACAS SOLARES	50
2.3.1. IMPACTOS AMBIENTAIS.....	52
2.3.2. DECRETO Nº 10.240/2020	55
2.3.3. REGULAMENTAÇÃO EUROPEIA DESTINADA À LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	59
CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

INTRODUÇÃO

No contexto da produção global de energia elétrica, tem-se que o setor desempenha um papel significativo nas emissões de gases de efeito estufa, respondendo por aproximadamente 75% do total de emissões globais (CLIMATE WATCH, 2019)¹. Tais emissões têm sua origem principalmente na extração e geração de energia a partir de fontes de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, consideradas não renováveis. Certo é que a crescente demanda global por energia é um fato incontestável, entretanto, levando em consideração que as fontes de geração não renováveis são extremamente prejudiciais ao meio ambiente, há uma movimentação global voltada à transição energética para o desenvolvimento de fontes de geração de energia elétrica de baixo carbono, consideradas limpas e renováveis.

O Brasil, com sua vasta dimensão geográfica e um cenário propício para a expansão das usinas de energia renovável, sempre esteve à frente no uso de fontes de energia limpa. Desde o Império, quando já utilizava a força da água para gerar eletricidade, o país se destacou, motivando outras regiões a seguirem o exemplo na busca por fontes renováveis de energia. Essa tradição culminou na atual posição do Brasil como um dos maiores produtores de energia renovável do mundo, com cerca de 88% de sua oferta interna proveniente de fontes limpas, em contraste com a predominância global de fontes não renováveis, que representam 71% da oferta global². Essa disparidade ressalta o compromisso e a condição vanguardista do Brasil para com a expansão de fontes de energia limpa.

Além disso, o país desfruta de condições solares favoráveis, tornando-o um terreno fértil para a energia fotovoltaica. Apesar disso, a geração de energia solar no Brasil é relativamente recente, tendo sido introduzida apenas em 2011, com a possibilidade de os consumidores gerarem sua própria eletricidade a partir de 2012, graças

¹ CLIMATEWATCH. Global Historical Emissions. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&end_year=2019§ors=total-including-lucf%2Cenergy&start_year=1990> Acesso em 17/09/2023.

² EPE, Empresa de pesquisa energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> 09.06.2023.

à Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que estimulou o uso de fontes de energia alternativas, como a solar.

No entanto, até recentemente, a produção de painéis solares no Brasil era limitada, o que levava a preços elevados e inibia a adoção dessa tecnologia. Todavia, na medida em que a energia fotovoltaica se popularizou e avanços tecnológicos aumentaram a eficiência dos painéis, isso reduziu consideravelmente seus custos.

Além disso, políticas de incentivo nacionais à energia solar fotovoltaica desempenharam um papel fundamental ao estimular a adoção desta fonte de energia. Isso não só reduz custos de energia a longo prazo, mas também contribui para uma transição energética em direção a uma geração de energia mais limpa e sustentável.

Apesar de a energia fotovoltaica ser considerada uma fonte de baixo impacto ambiental durante sua vida útil de mais de 30 anos³, a produção e descarte dos materiais envolvidos não estão isentos de impactos ambientais. Portanto, é crucial adotar uma abordagem responsável para o gerenciamento de resíduos, visando à proteção da saúde humana e do meio ambiente, bem como a redução dos impactos associados à extração, fabricação e descarte dos materiais dos painéis solares.

O problema subjacente que esta pesquisa se propõe a abordar reside na eficácia da legislação de logística reversa no Brasil, particularmente em relação aos painéis solares fotovoltaicos. Esta investigação se baseia em uma ampla gama de pesquisas, tanto teóricas quanto práticas, que incorporam dados e estatísticas de âmbito nacional e internacional. A pesquisa abordou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabelece princípios e instrumentos econômicos voltados para o gerenciamento de resíduos no final do ciclo de vida de produtos, explorando um desses instrumentos, a logística reversa, e sua aplicação aos painéis solares fotovoltaicos por meio do Decreto nº 10.240/2020, que trata da logística reversa de aparelhos elétricos e eletrônicos de uso doméstico, no qual se encaixam os painéis solares.

O cerne deste estudo, então, está em verificar se a legislação brasileira é suficiente para regular a logística reversa de painéis solares em um futuro próximo, quando muitos desses painéis atingirão o fim de sua vida útil. Isso é essencial para garantir que a geração de energia solar fotovoltaica seja verdadeiramente verde e sustentável, abordando não

³ NIERO, Thais. Ecycle website. Artigo: Energia solar é renovável ou não renovável?. 2022. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/energia-solar-e-renovavel-ou-nao-renovavel/>> Acesso em 24.08.2023

apenas sua fase operacional, mas também os impactos ambientais e legais associados ao ciclo de vida como um todo.

1. LOGÍSTICA REVERSA: ASPECTOS GERAIS

1.1. DO DIREITO CONSTITUCIONAL AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Apesar da percepção jurídica do direito ambiental ser bastante recente em decorrência da determinação do bem jurídico “meio ambiente”, a degradação ambiental não é um fenômeno dos dias atuais. Já na época do Brasil Colônia a proteção ao ambiente era objeto de preocupação, encontrada na legislação portuguesa, que vigorou até a promulgação do Código Civil de 1916.

Em que pese a legislação pátria pré-republicana ter se dirigido ao tema, não se pode olvidar de que tais instrumentos normativos eram mais esparsos, complexos e inadequados. Soma-se a isso a ideia de que as ordenações trazidas tinham como fim maior a proteção da propriedade da nobreza e da Coroa, de modo que os interesses ambientais objetivos eram endereçados de forma secundária.

O que se tinha, à época, eram embriões jurídicos para uma ação do Poder Público na tutela de alguns recursos naturais (MILARÉ, 2011)⁴, contudo, na medida em que os anos avançavam, vozes ecoavam dos movimentos ambientalistas que posteriormente tornar-se-iam parte na defesa do patrimônio ambiental coletivo.

Surgido no século XX, o direito ambiental da forma que conhecemos caracteriza-se por ser um ramo do direito bastante novo, ao qual foi dado berço em razão das consequências das atividades humanas desenvolvidas ao longo do tempo, na medida em que os efeitos da degradação ambiental e da poluição, até então desconhecidos, se intensificaram e foram percebidos em diversas regiões do planeta.

Nesse contexto, foram dados os primeiros passos com vistas a tentar reduzir os impactos sentidos sob a ótica do coletivo, abrindo espaço para a discussão sobre a necessidade de organização das atividades humanas a partir da promoção de uma política de proteção do meio ambiente. Nasce, então, a ideia de direito ambiental como forma de proteção do meio ambiente e dos recursos naturais, a partir da regulamentação das atividades humanas com potencial ofensivo.

⁴ MILARÉ, Édís. Direito do ambiente. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

Para limitar a degradação ocasionada pela vida moderna (DESPAX, 1980)⁵, o direito ambiental surge como um conjunto de normas responsáveis por disciplinar as atividades humanas, com o fim precípua de garantir a maior proteção ambiental possível frente à necessidade do desenvolvimento econômico. Seja impondo limites à atuação dos indivíduos ou direcionando os comportamentos que estes devam seguir por meio de instrumentos sociais e econômicos, o direito ambiental busca minimizar os danos ao meio ambiente decorrentes da atividade humana.

Não se busca, portanto, impedir a exploração de recursos naturais, senão garantir a perenidade dos bens naturais, de tal sorte que a pessoa humana possa viver de maneira sadia e equilibrada, se perpetuar, e garantir a qualidade ambiental necessária para que as demais espécies existentes também possam, sem que tais recursos sejam exauridos.

No Brasil, apesar do ordenamento jurídico haver previsto, ao longo da sua existência, algumas manifestações legais que expressavam a preocupação do legislador em endereçar problemas ambientais, apenas na década de 60, em razão da crescente impossibilidade de recuperação dos recursos naturais, e contando com o surgimento do movimento ecológico, o assunto foi paulatinamente abordado, cada vez com maior veemência, a partir de normas diretamente dirigidas à prevenção e controle da degradação ambiental. Receosa com o processo de industrialização predatório e o crescimento econômico desenfreados, ao final dos anos 60, a Suécia propôs à Organização das Nações Unidas que fosse promovida uma conferência internacional, buscando não só discutir os problemas ambientais existentes, que já alcançavam uma dimensão global, mas trazer a variável *ambiental* em todos os aspectos da atividade humana.

Durante a realização do evento, em 1972, houve divergências entre posições adotadas por países ricos e industrializados em contraponto a países subdesenvolvidos, na medida em que os primeiros, tendo utilizado recursos naturais da maneira que bem entenderam, tentavam desacelerar e encarecer a industrialização dos segundos.

Apesar das divergências que surgiram no curso da Conferência, do encontro originou-se a chamada Declaração de Estocolmo, que não só considerou a situação desigual entre diferentes países, como estabeleceu que para realidades diversas há de se

⁵ DESPAX, Michel. *Droit de l'environnement*. Paris, Libr. Technique, 1980. Disponível em: <<https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:rede.virtual.bibliotecas:livro:1980:000098704>> Acesso em 20.07.2023

endereçar os problemas ambientais diversamente, desde que todos respeitem a proteção ao meio ambiente. Foi consenso, então, de que a cooperação entre os dois blocos (desenvolvidos e subdesenvolvidos) era fundamental para buscar soluções adequadas a todos, na proteção ao meio ambiente e na redução da distância socioambiental entre ambos.

A Declaração de Estocolmo, então, impôs aos seus signatários a obrigação de proteger e melhorar o meio ambiente em benefício da pessoa humana e sua posteridade, tendo redigido, para tanto, 26 princípios que sumarizaram a preocupação com o meio ambiente e o desenvolvimento econômico. Levando isso em consideração, os Estados participantes externaram sua preocupação com o justo desenvolvimento a partir da elaboração de alguns princípios que posteriormente seriam englobados em um, o princípio do desenvolvimento sustentável.

Conforme preceitua a Constituição Federal Brasileira de 1988⁶, a defesa do meio ambiente deve não só considerar as ações do Poder Público para que seja efetivada, mas integrar, igualmente, a agenda privada. Isso porque, para além do desenvolvimento ambiental, deve ser levado em consideração que o desenvolvimento sustentável defendido pela Carta Maior abrange, também, o desenvolvimento social e econômico, sagrando-se como um direito e um dever constitucional fundamental (preâmbulo e artigos 1º, inciso III; 3º, inciso II; 5º, parágrafo 2º; 170; 225).

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente de Desenvolvimento definiu desenvolvimento sustentável como *“aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades”*⁷.

Nesse sentido, as atividades que vierem a ser desenvolvidas por humanos devem sempre considerar, sob a égide da disponibilidade dos recursos naturais, a possibilidade de se manterem para as gerações futuras. Significa dizer, portanto, que na eventualidade de uma atividade conjecturar o perecimento de determinado recurso natural, os cuidados

⁶ BRASIL. Constituição Federal da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm> Acesso em 20.07.2023

⁷ COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Nosso futuro Comum. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991, pág. 46. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod_resource/content/3/Nosso%20Futuro%20Comum.pdf> Acesso em 20.07.2023

que deve se ter com a autorização para essa exploração devem ser redobrados, quando não restringidos por completo.

O desenvolvimento sustentável deve pautar-se na redefinição das relações entre sociedade humana e natureza, de forma que a percepção de natureza, enquanto um conjunto de matérias-primas a serem consumidas como meio para obtenção de progresso e felicidade, deve ser modificada. Isso em vista, o desenvolvimento deve ser um produto do crescimento econômico aliado ao bem-estar econômico e social.

Não há como se falar em desenvolvimento sustentável se não houver um acordo entre a satisfação do mínimo social, a garantia de existência digna, a boa governança e o meio ambiente ecologicamente equilibrado. Desta sorte, referido princípio deve, em sua essência, proteger direitos fundamentais como a vida, a saúde e o meio ambiente equilibrado, não sendo antítese ao desenvolvimento econômico, pois aqui se está diante de um princípio que busca aliar o crescimento econômico sem destruir os recursos e o ambiente em que as gerações e espécies, atuais e futuras, dependerão para subsistir.

Essa integração das diversas formas de desenvolvimento deve buscar sua perenidade na medida em que os impactos ambientais e sociais permaneçam em equilíbrio com o crescimento econômico. Nesse sentido, cabe ao legislador, em atendimento ao quanto disposto na Constituição Federal, garantir com que o Poder Público adote políticas que visem minimizar os impactos ambientais e à sociedade.

Em que pese a necessidade de o desenvolvimento econômico incluir a proteção ao meio ambiente em todas as suas ações e atividades, há uma crescente cultura do consumo instalada na sociedade contemporânea, ocasionando um aumento no volume de resíduos em todo o mundo. Isso porque, apesar de o processo de crescimento e desenvolvimento ser indispensável à economia, o consumo acelerado de serviços e produtos em forma de bens resultam no acúmulo de resíduos que, se não gerenciados corretamente, podem comprometer o desenvolvimento regional futuro (DANDARO, 2015)⁸⁸.

A problemática dos resíduos sólidos, entretanto, não é nova, mas apresenta-se de forma mais definida e complexa atualmente, reflexo do estado da civilização em que nos

⁸⁸ DANDARO, F. (2015). Policy national solid waste as tool for regional sustainable development. Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental, 19(3), 387–394. <https://doi.org/10.5902/2236117019007>> Acesso em 20.07.2023

encontramos (MILARÉ, 2011). A legislação brasileira, a partir de marcos legais como a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981)⁹ e a Constituição Federal de 1988, ampliou sua preocupação com o manejo de resíduos a partir da Lei nº 10.257/2001¹⁰ conhecida como o Estatuto da Cidade.

Responsável por regulamentar os artigos 182 e 183 da Constituição, a Lei supracitada estabelece diretrizes gerais da política urbana em solo nacional, uma ferramenta indutora da sustentabilidade urbana, tendo como foco principal a promoção da qualidade de vida das pessoas, bem como do equilíbrio ambiental. Dentre suas determinações, imperioso ressaltar que o saneamento ambiental, disposto no art. 2º, inciso I, da Lei nº 10.257/2001, está entre uma dessas diretrizes gerais que devem ser observadas, sendo este um conjunto de políticas ambientais que visam melhorar a qualidade de vida da população.

Ainda sem remeter o manejo de resíduos sólidos diretamente, o legislador endereçou tangencialmente essa questão a partir da Política Federal de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007¹¹), na medida que o art. 2º, inciso III, da Lei, exige a limpeza e o manejo dos resíduos sólidos, como um dos princípios fundamentais ao saneamento básico, conceito abrangido pela amplitude do saneamento ambiental.

Apenas em 2010, com o advento da Lei nº 12.305/2010¹², que o Congresso Nacional tratou de estabelecer uma política específica para o tratamento e destino de resíduos sólidos como forma de tentar superar suas adversidades ao invés de contorná-las.

Com a chamada Política Nacional dos Resíduos Sólidos, tem-se o endereçamento de questões bastante sensíveis e que oferecem graves riscos ao coletivo, uma vez que a

⁹ BRASIL. Lei nº 6.938/1981, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm> Acesso em 20.07.2023

¹⁰ BRASIL. Lei nº 10.257/2001, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm> Acesso em 20.07.2023

¹¹ BRASIL. Lei nº 11.445/2007, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm> Acesso em 20.07.2023

¹² BRASIL. Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em 20.07.2023

situação se agrava pela contaminação do solo e das águas subterrâneas a partir da disposição inadequada de resíduos, oferecendo risco à saúde pública e biota, bem como à utilização adequada de recursos naturais em benefício da sociedade. Sendo assim, o legislador tratou de estabelecer princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, bem como previu instrumentos econômicos para a internalização de externalidades negativas.

1.2. POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (LEI Nº 12.305/2010)

“A questão da produção de resíduos sólidos (RS) e de sua gestão tem desafiado os serviços de limpeza urbana, e os problemas revelam-se cada vez mais graves e difíceis de serem solucionados. A superprodução e a má gestão dos resíduos sólidos desafiam os serviços de limpeza pública a buscar novas tecnologias e sistemas de tratamento”¹³

De início, cumpre ressaltar que a espécie humana é a única que produz resíduos. O *Homo Lixus*¹⁴, conforme definido por Marcelo Andrés Ribeiro, caracteriza-se por ser aquele que produz, a partir da natureza e de seus recursos naturais, todo tipo de resíduos para os bens e serviços que consome.

Antes da Primeira Revolução Industrial, o lixo poderia ser entendido como um conjunto de resíduos domésticos que, a princípio, a sua composição não constituiria um problema mundial, senão “apenas” ameaças à saúde decorrentes do mau cheiro e da propagação de doenças. Perpassado esse período, houve um aumento considerável na produção em série de bens de consumo, fato que, com o decorrer dos anos, daria um grande impulso à problemática da geração e descarte do lixo, que envolveria, também, riscos ao ambiente e à administração pública. Um problema diretamente relacionado ao dinamismo econômico e ao crescimento urbano.

A partir do intenso crescimento na produção de produtos com ciclos de vida cada vez menores em escala mundial (fenômeno conhecido como “obsolescência

¹³ TONETO JÚNIOR, R.; SAIANI, C. C. S.; DOURADO, J. Resíduos sólidos no Brasil: oportunidades e desafios da Lei Federal Nº 12.305 (Lei de Resíduos Sólidos). Barueri: Manole, 2014.

¹⁴RIBEIRO, Maurício Andrés. Do Homo sapiens ao Homo ecologicus. Pág. 05. Disponível: <<https://docplayer.com.br/28526397-Do-homo-sapiens-ao-homo-ecologicus-mauricio-andres-ribeiro.html>> Acesso em 20.07.2023

programada”), principalmente na segunda metade do século XX é que a produção e o acúmulo de lixo passaram a ser enxergados como um problema. Isso porque, ao contrário do acúmulo de substâncias na água e no ar, que diluem os resíduos provenientes das mais variadas atividades humanas e as poluições atmosféricas, transportando-os para outras regiões ao longo do tempo – dando a sensação de que o problema foi resolvido – os resíduos sólidos permanecem nos lugares em que foram lançados.

No Brasil, por volta dos anos 1930, houve o aumento expressivo no número de indústrias, dando espaço para o crescimento e desenvolvimento da sociedade de consumo no âmbito nacional. Nessa época, então, houve uma reestruturação das relações de produção com vistas a atender às expectativas do mercado, que mudava a sua forma de consumir.

Com o investimento na indústria, a produção de bens de consumo buscava acompanhar as mudanças nas relações econômicas surgidas pós-segunda guerra mundial, a qual demandava uma produção em série de bens e produtos, aliada à sua distribuição em massa. Para o professor Ivan Oliveira da Silva¹⁵, trata-se de uma sociedade em que as pessoas se tornam colecionadoras de objetos de durabilidade efêmera, como o caso de produtos descartáveis, por vezes aqueles que serão utilizados apenas uma vez, por outras, sujeitos às tendências, de moda ou das diversidades pessoais e sociais, os quais rapidamente se tornam “ultrapassados”.

Nesse ínterim de produção e consumo em massa desenfreados, em que os avanços tecnológicos da indústria permitiram a criação e produção de cada vez mais produtos, há uma predisposição da própria indústria em confeccionar produtos ainda mais descartáveis, resultando na aceleração da obsolescência para que possam dar espaço às novas tendências que se formarão em seguida. O resultado que se tem a partir da produção de bens para a sociedade de consumo é a produção desenfreada de resíduos sólidos, os quais, se não destinados corretamente quando do fim de seu ciclo de utilização, podem oferecer graves riscos ao meio ambiente e, conseqüentemente, à saúde pública e biota.

Conforme mencionado, a legislação brasileira, à época, não havia endereçado a questão dos resíduos sólidos em um instrumento normativo próprio para que pudesse dar enfoque à questão. Com a promulgação da Constituição Federal de 1988, o constituinte

¹⁵ SILVA, Ivan de Oliveira. Relação de Consumo Religiosa. A vulnerabilidade do fiel-consumidor e a sua tutela por meio do Código de Defesa do Consumidor. São Paulo: Atlas, 2012

facultou aos municípios que se organizassem e legislassem, de forma complementar à legislação federal, sobre serviços públicos de interesse local de caráter essencial. Nos termos do art. 30, incisos I, II e V, da Carta Magna, deriva-se a interpretação de que eles seriam os titulares de serviços de limpeza urbana e, por conseguinte, de toda a gestão de manejo dos resíduos sólidos, desde a sua coleta até a sua destinação final.

Ocorre, todavia, que apesar do texto constitucional dispor sobre o assunto de tal maneira, ainda não existia uma norma que estabelecesse diretrizes gerais aplicáveis aos resíduos sólidos para que os estados e municípios pudessem se orientar. O que se tinha, até então, eram Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, bem como algumas legislações estaduais e municipais, que abordavam a temática.

Com vistas a iniciar a discussão e elaboração de um plano nacional que pudesse estabelecer orientações gerais acerca da disposição de resíduos sólidos em âmbito nacional, foi recebido na Câmara dos Deputados, em 1º de abril de 1991, o Projeto de Lei 203/1991¹⁶. De início, o PL buscou estabelecer o conceito de resíduos de serviço de saúde, os estabelecimentos que estavam sujeitos à aplicação da norma e a classificação dos tais resíduos.

Feitas tais considerações iniciais, o projeto determinava que os *Estabelecimentos Geradores de Resíduos* fossem responsáveis pela classificação e separação dos resíduos por categoria, dando o acondicionamento apropriado para cada categoria de resíduos, bem como estabeleceu as obrigações da administração municipal, responsável pelo serviço regular de coleta e transporte dos resíduos de saúde e por dar a destinação final adequada aos resíduos coletados.

Em razão da abrangência e da complexidade, foram feitas muitas considerações no projeto ao longo do tempo. Somente em 2004 o Ministério do Meio Ambiente empenhou esforços para que se instituísse no Brasil uma Política Nacional dos Resíduos Sólidos, com a criação de diretrizes gerais que pudessem ser aplicadas Brasil adentro. A partir daí a discussão se intensificou dentro do Governo, que criou um grupo interno de discussão responsável por consolidar as contribuições existentes e os anteprojetos que foram propostos no Congresso Nacional ao longo da Tramitação do PL 203/1991 e

¹⁶BRASIL. Projeto de Lei, de 01 de abril de 1991. Dispõe sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=15158>> Acesso em 20.07.2023

envolveu outros Ministérios com temáticas correlatas para contribuírem na elaboração de um Plano Nacional de Resíduos Sólidos (“PNRS”).

Foi então que, em 02 de agosto de 2010, o Presidente da República sancionou a Lei nº 12.305/2010, instituindo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos relativos à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, bem como às responsabilidades dos geradores de resíduos e do poder público, prevendo, também, aparatos econômicos para tanto. Dentre os instrumentos econômicos previstos nos incisos do art. 42, da PNRS, faz-se especial menção, para fins deste trabalho, à estruturação de sistemas de logística reversa (inciso V) e de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos (inciso VIII).

Nessa esteira, a PNRS instituiu metas e ações que devem ser adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Municípios, Distrito Federal ou particulares, visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (MILARÉ, 2011)¹⁷. Nos termos da Lei nº 12.305/2010, e em observância à Carta Maior, estão sujeitas à aplicação da Lei as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e as que desenvolvam ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de tais resíduos¹⁸.

Ainda, cumpre trazer os princípios que fundamentam a Política Nacional de Resíduos sólidos, quais sejam: (i) da prevenção e da precaução; (ii) do poluidor pagador e do protetor-recebedor; (iii) a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; (iv) do desenvolvimento sustentável; (v) da ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta; (vi) da cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade; (vii) da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; (viii)

¹⁷ MILARÉ, Édís. Direito do ambiente. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011. Fls. 860

¹⁸ Vide art. 1º, §1º da Lei 12.305/2010

do reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania; (ix) do respeito às diversidades locais e regionais; (x) do direito da sociedade à informação e ao controle social; e (xi) da razoabilidade e a proporcionalidade.

Para Patrícia Iglesias Lemos (2008)¹⁹, o princípio da prevenção se divide em três frentes, quais sejam: o da prevenção fundamental, que faz um paralelo entre a produção e a valoração do produto; a prevenção corretiva, que versa sobre a retificação de erros e o aperfeiçoamento progressivo e contínuo; e a prevenção terminal, relacionada à coleta seletiva e a reciclagem. Depreende-se, portanto, que a produção de resíduos deve ser evitada ao máximo, utilizando-se de mecanismos, como a logística reversa, para compor o processo de produção, em uma economia circular em detrimento da linear, a fim de reduzir a utilização de recursos naturais e incentivar o consumo sustentável.

A logística reversa caracteriza-se, então, por ser um instrumento que concretiza a responsabilidade compartilhada, na medida em que estrutura e implementa um sistema de retorno dos produtos após encerrados os respectivos ciclos de vida, sem a necessidade de atuação do serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos. Disposto no art. 8º, inciso III, da Lei nº 12.305/2010, esse instrumento funda-se no princípio do poluidor pagador, do direito ambiental, na medida em que impõe aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes o ônus de internalizarem aos seus custos a destinação e disposição final de resíduos sólidos provenientes dos produtos que por eles são introduzidos no mercado.

Quanto ao princípio do poluidor pagador e do protetor recebedor, aqui busca-se não apenas responsabilizar o agente que inserir um produto no mercado e que, eventualmente, será considerado “lixo”, mas a PNRS introduziu, ainda, o segundo princípio, o qual refere-se aos instrumentos econômicos previstos na Lei, por meio do qual prevê a possibilidade de recebimento de recursos financeiros em contraprestações a ações voltadas à proteção do meio ambiente.

Importante mencionar que a institucionalização da PNRS trouxe a matéria para o âmbito do desenvolvimento sustentável, na medida em que, ao alterar juridicamente a denominação de resíduos sólidos de lixo para bem (art. 6º, inciso VIII), o legislador

¹⁹ LEMOS, Patrícia Faga Iglesias. Direito ambiental: responsabilidade civil e proteção do meio ambiente. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2008

manifestou o valor econômico e social dos resíduos sólidos, empregando uma ótica de proteção ambiental e desenvolvimento social. Isso porque, ao reconhecer os resíduos como bens, com valor econômico, a legislação buscou influenciar a transformação da cadeia produtiva, para superação do modelo econômico linear em favorecimento do sistema circular, visando manter o valor dos produtos por mais tempo e reduzir o desperdício.

Nessa esteira, vale destacar que a gestão integrada de resíduos sólidos e os instrumentos econômicos trazidos pela PNRS buscam se unir com vistas a tornarem-se um conjunto de ações direcionadas à busca por soluções para os resíduos sólidos, devendo-se considerar as dimensões políticas, econômicas, ambientais, culturais e sociais.

No que diz respeito ao princípio da razoabilidade e da proporcionalidade frente à PNRS, insta dizer que a dimensão da responsabilidade pela gestão dos resíduos transcende, agora, a esfera da administração pública, passando a compor esse rol as empresas, a sociedade civil e as pessoas enquanto consumidoras. Nesse sentido, a razoabilidade aplicar-se-á quando não houver uma regra expressa e clara sobre o assunto, abrindo espaço para interpretações. Assim, a associação de ambos os princípios busca dar uma noção de equilíbrio no que diz respeito ao manejo dos resíduos sólidos, trazendo para a mesa a complexidade cultural e social que envolve o assunto.

Nota-se que os principais aspectos que norteiam a PNRS dizem respeito à responsabilização estendida (ou compartilhada) da cadeia de suprimentos, na medida em que busca evidenciar as responsabilidades dos entes públicos, mas principalmente das empresas envolvidas na fabricação, distribuição e comercialização dos produtos com vida útil expirada. Apesar de tratar de outros aspectos de retorno de produtos – com vistas a transformar a economia linear em circular –, a PNRS possui sua essência baseada na logística reversa, concomitante ou não.

Dentre outros instrumentos econômicos endereçados na PNRS para o tratamento de resíduos sólidos, o sistema da logística reversa consiste no *“instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada”*.

Para tanto, o passo inicial é a devolução de produtos utilizados pelo consumidor aos comerciantes e distribuidores, os quais, por sua vez, serão responsáveis por destiná-los aos fabricantes ou importadores, que deverão dar a destinação adequada a todos os itens que compõem o produto.

A PNRS, portanto, enxerga a logística reversa como um instrumento extremamente vocacionado ao desenvolvimento sustentável, objetivando dar a destinação ambientalmente adequada a produtos e embalagens, minimizando os riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Sua implantação é obrigatória aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, no limite da proporção dos produtos e embalagens que forem inseridos no mercado interno.

1.2.1. A GESTÃO INTEGRADA E O PRINCÍPIO DA RESPONSABILIDADE COMPARTILHADA

Antes do advento da PNRS, a obrigação e a responsabilidade pela gestão dos resíduos sólidos cabiam apenas ao titular do serviço de limpeza pública e ao próprio Poder Público. Com o advento desta Lei, entretanto, a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos foi compartilhada com todos os agentes envolvidos na cadeia desses produtos, a partir da institucionalização do princípio da responsabilidade compartilhada.

Nesse sentido, o legislador editou o art. 6º, inciso VII, da PNRS, por meio do qual instituiu o mencionado princípio à PNRS, tendo-o definido em seu art. 3º, inciso XVII, *in verbis*:

“XVII - responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei”

Para que os agentes não ficassem desamparados quanto aos objetivos que se pretendiam atingir a partir da institucionalização do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, o legislador, então, enumerou à que se destinam no art. 30, *in verbis*:

“Parágrafo único. A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos tem por objetivo:

I - compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis;

II - promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas;

III - reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;

IV - incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade;

V - estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis;

VI - propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade;

VII - incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.”

Cumprido destacar que tal responsabilização decorre da aplicação do princípio do poluidor pagador, o qual encontra definição legal na Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), em seu art. 4º, inciso VII, *in verbis*:

“VII - à imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos.”

Quando da edição da Constituição Federal de 1988, tal princípio também fora recepcionado em seu Capítulo VI do Título VIII, que versa acerca da Ordem Social e dá ênfase à importância de um meio ambiente ecologicamente equilibrado como um direito universal, um patrimônio coletivo e essencial para a saúde e o bem-estar de todos. Isso implica na responsabilidade compartilhada entre os cidadãos e o Poder Público na promoção da sua proteção e conservação (art. 225, *caput*). Nesse sentido, no §3º, do mesmo artigo, dita que as condutas e atividades danosas ao meio ambiente ensejarão aos infratores, pessoas jurídicas ou físicas, as sanções administrativas e penais, independente da obrigação de repararem os danos causados.

Diante desse contexto, pode-se dizer que a PNRS inovou ao trazer o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, na medida em que internalizou o princípio do poluidor pagador para que as externalidades negativas provindas da produção e consumo de bens sejam absorvidas por fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos

Desta sorte, todos devem atuar com vistas a reduzir os efeitos e o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, a fim de minimizar os efeitos negativos relacionados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos.

O ciclo de vida de produtos, por sua vez, se caracteriza por ser um aglomerado de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final (art. 3º, inciso IV, da PNRS). Depreende-se, portanto, que a disposição final de produtos representa o fim de seu ciclo de vida, isto é, após todo o tratamento feito visando a minimização de impactos ambientais adversos e danos ou riscos à saúde pública e à segurança, do qual resulta um resíduo sólido não passível de tratamento ou recuperação (denominado “rejeito”), sobre o qual deve ser considerada a possibilidade de dar uma disposição final ambientalmente adequada²⁰.

Em razão disso, considera-se parte do ciclo de vida do produto também os processos de reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético, para enfim encerrar o ciclo concomitantemente com a cadeia produtiva. Nesse sentido, deve-se levar em consideração que da reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético pode-se originar um novo produto ou embalagem, dotado de valor econômico e características próprias.

A partir da transformação do produto originalmente concebido, outros que decorram da utilização de tais ferramentas, tem-se o início de um novo ciclo, com a sua inclusão em uma cadeia produtiva renovada, mecanismo fundamental para a redução dos impactos ambientais a partir da utilização de materiais que não demandam a extração de novas matérias primas para tanto.

Retomando às obrigações das partes mencionadas no art. 30, da PNRS, cabe dizer que todas são comuns, porém diferenciadas. Isso porque, cada integrante no ciclo de vida do produto fica responsável pela cota-parte do processo, correspondente à sua parcela na internalização das externalidades negativas dos resíduos sólidos, a fim de que da soma dessas obrigações sejam minimizados os volumes de resíduos e rejeitos gerados, bem como seja dada a destinação ambientalmente adequada para os resíduos sólidos gerados.

²⁰ MILARÉ, Édís. Direito do Ambiente. 7ª Ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2011, pág. 895.

Nesse sentido, a PNRS não só redistribuiu os encargos que antes eram somente do Poder Público, do titular da limpeza e gerenciamento de resíduos urbanos e alguns setores empresariais, como também incluiu o consumidor final no rol de responsáveis pelo ciclo de vida dos produtos. Essa pulverização de obrigações e responsabilidades consagrou uma rede normativa que alcança todo o cenário que envolve resíduos sólidos.

Nesse sentido, o consumidor tem suas obrigações bem delimitadas nos artigos 35, da PNRS, bem como nos artigos 4º e 5º, do Decreto nº 10.936/2022, que regulamenta a Lei nº 12.305/2010, dentre as quais deve, diante do sistema de coleta seletiva estabelecida pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou sistema de logística reversa a que se refere o art. 18 do mesmo Decreto, se prontificar a: (i) acondicionar adequadamente e de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados; e (ii) disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou para devolução (art. 4º, incisos I e II). Nessa esteira, e sem que possa se isentar das obrigações acima mencionadas, o consumidor deverá, também, observar as regras previstas na legislação do titular do serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos referentes (i) ao acondicionamento; (ii) à segregação; e (iii) à destinação final dos resíduos.

Importante mencionar, ainda, que as informações acerca das formas de evitar, reciclar e eliminar os resíduos sólidos associados a seus respectivos produtos, devem ser feitas pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, nos termos do art. 31, inciso II, da PNRS, e, conforme Patrícia Lemos explica, devem ser claras, precisas, ostensivas e eficientes.

Dando seguimento aos demais responsáveis pelos processos de reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético de resíduos sólidos, o art. 31, da PNRS, disciplina, ainda, algumas responsabilidades compartilhadas específicas quanto ao setor empresarial, ou seja, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, *in verbis*:

I - investimento no desenvolvimento, na fabricação e na colocação no mercado de produtos:

- a) que sejam aptos, após o uso pelo consumidor, à reutilização, à reciclagem ou a outra forma de destinação ambientalmente adequada;
- b) cuja fabricação e uso gerem a menor quantidade de resíduos sólidos possível;

- II - divulgação de informações relativas às formas de evitar, reciclar e eliminar os resíduos sólidos associados a seus respectivos produtos;
- III - recolhimento dos produtos e dos resíduos remanescentes após o uso, assim como sua subsequente destinação final ambientalmente adequada, no caso de produtos objeto de sistema de logística reversa na forma do art. 33;
- IV - compromisso de, quando firmados acordos ou termos de compromisso com o Município, participar das ações previstas no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, no caso de produtos ainda não inclusos no sistema de logística reversa.

Significa dizer, então, que o setor empresarial, através do princípio da responsabilidade compartilhada, deve adotar comportamentos com vistas a, ainda no âmbito do pré-consumo, investir no desenvolvimento, fabricação e na inserção no mercado de produtos que sejam adequados e destinados, após o uso do consumidor, à reutilização, reciclagem ou outros meios de destinação ambientalmente adequada; bem como investir no desenvolvimento, na fabricação e na distribuição de produtos que gerem menor ou nenhuma quantidade de resíduos sólidos; recolher os produtos e resíduos remanescentes após o uso, propiciando a destinação final adequada para cada um; e tomar parte em ações do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, no caso de produtos ainda não inclusos no sistema de logística reversa, sempre que se comprometer, em acordos setoriais ou termos de compromisso com o Município.

Nesse íterim, o art. 8º, inciso III, da PNRS elenca alguns instrumentos econômicos relacionados à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos na etapa de destinação final ambientalmente adequada, dos quais cabe especial menção à logística reversa. Esta ferramenta impõe responsabilidade jurídica às empresas e pessoas físicas, desde a fabricação dos produtos até o seu descarte responsável no pós-consumo. Ocorre, todavia, que a logística reversa não se aplica a todos os produtos, senão àqueles que possuem expressa determinação legal, regulamentar ou de acordos que a colocarão em prática.

1.3. ASPECTOS LEGAIS CONCERNENTES À LOGÍSTICA REVERSA

Paulo Roberto Leite (2002, págs. 122-131) define logística reversa como:

“[...] área da Logística Empresarial que planeja, opera e controla o fluxo, e as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, através dos Canais de Distribuição Reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.”²¹

Doutra sorte, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu art. 3º, XII, define-a como, *in verbis*:

“instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada”

A construção das normas sob a égide do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, incluindo-se os sistemas de logística reversa, constitui o exemplo mais evidente desse aprendizado político. Isso porque o instrumento constitui uma das ferramentas aplicadas a partir do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, na medida em que exige que os geradores de resíduos internalizem aos seus custos operacionais as externalidades negativas de suas atividades, no caso visando dar a destinação adequada para os componentes do produto e, por fim, seja dada a destinação final para os produtos.

No teor da Lei nº 12.305/2010, em seu art. 33, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes deverão estruturar e implementar a logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, para os seguintes produtos:

“I - agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas;
 II - pilhas e baterias;
 III - pneus;
 IV - óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;
 V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;
 VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes.”

²¹ LEITE, P. R. Logística reversa: nova área da logística empresarial. Tecnológica, ed. 78, p. 122-131, 2002.

Conforme os parágrafos 1º e 2º do art. 33º da mesma disposição normativa, a logística reversa poderá se estender a produtos comercializados em embalagens plásticas, metálicas ou de vidro, e aos demais produtos e embalagens, considerando, prioritariamente, o grau e a extensão do impacto à saúde pública e ao meio ambiente dos resíduos gerados. Sem prejuízo das demais exigências específicas, cabe aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes dos produtos dos produtos supracitados implementar e operacionalizar o sistema de logística reversa sob seu encargo, podendo, dentre outras medidas: (i) implantar procedimentos de compra de produtos ou embalagens usados; (ii) disponibilizar postos de entrega de resíduos reutilizáveis e recicláveis; e (iii) atuar em parceria com cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

Para tanto, conforme os parágrafos 4º e 5º seguintes, importante destacar que cabe aos consumidores efetuarem a devolução, após o seu uso, aos comerciantes ou distribuidores, dos produtos e das embalagens incluídos no rol da logística reversa, ao passo que aos comerciantes e distribuidores deverão efetuar a devolução aos fabricantes ou aos importadores dos produtos e embalagens reunidos ou devolvidos. Aos fabricantes e importadores, por sua vez, caberá a destinação ambientalmente adequada aos produtos e às embalagens reunidos ou devolvidos, sendo o rejeito encaminhado para a disposição final ambientalmente adequada, na forma estabelecida pelo órgão competente do SISNAMA e, se houver, pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (vide parágrafo 6º).

Ademais, todos os agentes abrangidos pelo sistema da logística reversa, à exceção dos consumidores, deverão manter atualizadas e disponíveis ao órgão municipal competente e a outras autoridades informações completas sobre a realização das ações sob sua responsabilidade (parágrafo 8º).

Nos termos do art. 18, do Decreto nº 10.936/2022 que regulamenta a PNRS, os sistemas de logística reversa serão instituídos por meio de:

- I. *Acordos setoriais*: ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto²²;
- II. *Regulamentos editados pelo Poder Público*: estes vinculados pelo Poder Executivo, a partir de elaboração de proposta de regulamento pelo Ministério do Meio Ambiente, obedecidas as disposições do §1º, do art. 18, do Decreto nº 10.936/2022, que deverá passar por consulta pública que precederá a oitiva de órgãos federais com competências relacionadas a matéria para, então, o MMA possa consolidar todas as contribuições e concluir pela viabilidade da proposta²³;
e
- III. *Termos de compromisso*: celebrados entre o Poder Público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes dos produtos tratados no art. 33, da PNRS, a serem homologados pelo MMA, para a implantação de sistema de logística reversa: (i) nas hipóteses em que não houver, na mesma área de abrangência, o acordo setorial ou o regulamento específico; ou (ii) para o estabelecimento de compromissos e metas mais exigentes do que aqueles previstos no acordo setorial ou no regulamento, ambos de acordo com o art. 18, do Decreto nº 10.936/2022.

Insta dizer que os acordos setoriais e termos de compromisso podem ter abrangência nacional, regional, estadual ou municipal²⁴, entretanto, aqueles firmados em âmbito nacional terão prevalência sobre os firmados em âmbito regional ou estadual, e estes sobre os firmados em âmbito municipal. Ainda, em consonância à regra geral das normas de proteção ambiental, o §2, do art. 34, da PNRS, dispõe que as medidas a serem adotadas no âmbito do §1º, do art. 33, da mesma Lei, e que tenham menor abrangência geográfica, podem ampliar (observadas as exigências específicas das normas), mas nunca abrandar, as medidas de proteção ambiental constantes nos acordos setoriais e termos de compromisso firmados com maior abrangência geográfica, como também disposto no art. 19, do Decreto nº 10.936/2022.

²² Art. 3º, inciso I, da Lei nº 12.305/2010.

²³ Art. 24 e 25, do Decreto 10.936/2022.

²⁴ Art. 34, da Lei nº 12.305/2010.

Ficam responsáveis, conforme disposição do §1º, do art. 14, do Decreto nº 10.936/2022, os fabricantes, os importadores, os distribuidores e os comerciantes pela realização da logística reversa no limite da proporção dos produtos que colocarem no mercado interno, mediante o seu retorno pelo consumidor após o seu uso, conforme metas progressivas, intermediárias e finais estabelecidas no instrumento que determinar a implementação da logística reversa.

Com esse fim, é permitido ao setor empresarial, dentre outras medidas, que institua procedimentos de compra de produtos e embalagens usados e de disponibilização de pontos de coleta de resíduos reutilizáveis e recicláveis, bem como é incentivada a atuação em parceria com cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis²⁵

Apenas para que não reste inatacado, cumpre mencionar que o art. 33, §7º da PNRS, estabelece que o titular do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, ao se encarregar de atividades de responsabilidade dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, por meio de acordo setorial ou termo de compromisso firmado com o setor empresarial, nos sistemas de logística reversa dos produtos e embalagens, deverão ter as ações promovidas devidamente remuneradas, na forma previamente acordada entre as partes.

1.4. MEIO AMBIENTE E PLACAS SOLARES

Seja pelo crescimento populacional ou a ânsia pelo desenvolvimento socioeconômico, certo é que o aumento da demanda de energia elétrica é um fato mundial. No cenário nacional, por exemplo, a capacidade instalada de geração de eletricidade – isto é, o total de eletricidade que pode ser gerada se todas as turbinas das usinas de geração de energia elétrica brasileiras forem ligadas ao mesmo tempo -, se expandiu em 4,5%

²⁵ Art. 33, §3º, da Lei nº 12.305/2010 e art. 14, §§2º e 3º, do Decreto nº 10.936/2022.

apenas no ano de 2022^{26/}, correspondente a 8 GW, ao passo que, apenas no primeiro semestre de 2023, já conta com aumento de 2,6%²⁷ do total atual, ou seja, 5,1 GW.

No âmbito da geração de energia elétrica mundial, tem-se que o setor está entre os maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, aproximadamente 75% do total de emissões globais (CLIMATE WATCH, 2019)²⁸, estes provenientes principalmente da extração e produção de energia a partir de combustíveis fósseis, tais como petróleo, gás natural e carvão. Nessa toada, o fomento à utilização de energia de fontes renováveis, combinado com o desencorajamento do uso de combustíveis fósseis, além de promover o investimento em tecnologia e eficiência energética, foram e são pilares fundamentais à transição energética de baixo carbono.

No cenário global, a matriz elétrica – conjunto de fontes utilizadas para a geração de energia elétrica – é composta majoritariamente por fontes de energia não renováveis²⁹, que somam aproximadamente 71% do total. Quando observados os dados relativos à matriz elétrica brasileira, por outro lado, é possível dizer que o Brasil difere do resto do mundo, porquanto as fontes renováveis representam 88% da oferta de energia nacional³⁰. Isso se deve ao fato de que o Brasil é um país com grande potencial de aproveitamento de fontes naturais para a geração de sua energia elétrica.

Nesse contexto, tem-se que a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis teve seu marco inicial em 1883, com a inauguração de uma usina hidrelétrica

²⁶ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Brasil supera em 2022 os 8 GW de expansão na capacidade instalada*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-supera-em-2022-os-8-gw-de-expansao-na-capacidade-instalada#:~:text=Brasil%20supera%20em%202022%20os%208%20GW%20de%20expans%C3%A3o%20na%20capacidade%20instalada,-Montante%20%C3%A9%20o&text=O%20ano%20de%202022%20ser%C3%A1,energia%20gerada%20por%20fontes%20renov%C3%A1veis>> Acesso em 12.08.2023

²⁷ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Sistema de informações de Geração da ANEEL - SIGA - Data de referência dos dados*: 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWY2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>> Acesso em 12.08.2023

²⁸ CLIMATEWATCH. *Global Historical Emissions*. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&end_year=2019§ors=total-including-lucf%2Cenergy&start_year=1990> Acesso em 12.08.2023

²⁹ International Energy Agency. *Energy Statistics Data Browser*. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>> Acesso em 12.08.2023

³⁰ Ministério de Minas e Energia - Governo Federal do Brasil. *Balanco Energético Nacional - Relatório Final*. Ano 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>> Acesso em 12.08.2023

na cidade de Diamantina/MG, instalada por uma empresa mineradora, com finalidade de movimentar duas bombas de desmonte hidráulico de terreno diamantífero. Em se falando de geração para fornecer energia voltada a serviços de iluminação pública e particular a partir de fontes renováveis, esta se faz presente desde 1889, a partir da inauguração usina Marmelos Zero, construída no rio Paraibuna, em Juiz de Fora, Minas Gerais³¹.

A partir de então, infere-se que o país se encontra em posição de vanguarda na produção de energia limpa e sustentável, à medida em que a geração de energia a partir de usinas hidrelétricas se difundiu vagarosamente pelo Estado, seguida, também, pela difusão de usinas não renováveis.

Quanto ao Brasil, atualmente pode-se dizer que a busca por fontes de geração alternativas à hidrelétrica tem grande importância, uma vez que estas já não têm muito espaço para serem ampliadas como durante o século XX. Soma-se a isso o fato de que em 2001 o país vivenciou a maior crise de energia elétrica já vista, a qual foi potencializada pelas condições hidrológicas muito desfavoráveis, principalmente nas regiões sudeste e nordeste.

Tal se deu porque houve uma grande escassez de chuvas e falta de planejamento energético, os quais, aliados à alta demanda de energia elétrica e à grande dependência de usinas hidrelétricas para o abastecimento nacional, ocasionaram um sério risco de apagão por uma sobrecarga do sistema elétrico. O racionamento, então, foi a principal medida adotada com vistas a conter a crise de energia, contudo, a falta de garantia operacional dessa fonte demonstrou que o Brasil, que à época contava com 89% de sua matriz elétrica proveniente de hidrelétricas, deveria investir em outras fontes de energia com vistas a mitigar a ocorrência de episódios como este.

De proporções continentais e geolocalização que propiciam a exploração de fontes de energia como a eólica, solar e de biomassa, para além da hidráulica, de acordo com dados fornecidos pela IRENA, em termos de capacidade instalada, em 2021 o país foi

³¹ Memória da Eletricidade. Artigo: *Energia elétrica no Brasil: breve cronologia do setor elétrico brasileiro*. 2022. Disponível em: <<https://memoriadaeletricidade.com.br/artigos/119106/energia-eletrica-no-brasil-breve-cronologia-do-setor-eletrico-brasileiro>> Acesso em 12.08.2023

ranqueado na 3ª posição do mundo proveniente de energias renováveis, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos³².

Situado próximo à linha do Equador, os níveis de insolação e irradiação solar no território nacional são grandes aliados ao desenvolvimento e exploração desse extenso potencial energético. Nesse cenário, o uso de sistemas solares fotovoltaicos, ao adotarmos a emissão de Gases de Efeito Estufa como parâmetro, se mostra como uma alternativa bastante interessante, tendo em vista que não emite tais gases. Nos últimos anos, essa importante fonte vem crescendo a passos largos, impulsionado pelos benefícios econômicos e ambientais provenientes do seu aproveitamento, sendo responsável, atualmente, por 15,4% da matriz elétrica nacional (ABSOLAR, 2023)³³.

O mercado de energia solar no Brasil, entretanto, é novo. O termo legal inicial para a geração de energia solar fotovoltaica ocorreu apenas em 2012, quando a Agência Nacional de Energia Elétrica editou a Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, que estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica³⁴.

A partir desse marco, os brasileiros puderam se conectar à rede de distribuição de energia elétrica e gerar créditos solares a partir do excedente de energia que produzissem, consequentemente viabilizando e tornando mais atrativa a utilização desse sistema por consumidores residenciais.

Ocorre, todavia, que a produção de painéis fotovoltaicos importa na utilização de metais raros e demais componentes fundamentais para a construção dos painéis, de modo que a sua produção em massa pode trazer riscos à disponibilidade de recursos, bem como a busca por tais recursos trazem impactos ao meio ambiente.

Tal crescimento, que vem acompanhado da exploração por recursos e, com a sua obsolescência, faz-se necessária a regulamentação para um descarte responsável e

³²International Renewable Energy Agency. Country Rankings. Disponível em: <<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>> Acesso em 12.08.2023

³³ Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - ABSOLAR. Publicação no LinkedIn - Infográfico 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/posts/absolar---associa%C3%A7%C3%A3o-brasileira-de-energia-solar-fotovoltaica_infogr%C3%A1fico-absolar-setembro-activity-7111049073322815488-053K?utm_source=share&utm_medium=member_desktop> Acesso em 12.08.2023

³⁴ BRASIL. Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em 24.08.2023

sustentável de painéis solares, processo que não é simples, mas que, com o correto desmanche, pode levar à reciclagem de até 90% dos componentes.

Nesse cenário, e trazendo à discussão o quanto discutido nos capítulos anteriores, a regulamentação do inciso VI, do *caput* do art. 33 e 56 da Política Nacional de Resíduos Sólidos vem para tentar reduzir os impactos ao meio ambiente que a produção de lixo eletrônico, no caso de placas solares, pode ocasionar quando do seu descarte.

Certo é que este processo exige um considerável investimento, esforço e trabalho humano para realizar a coleta seletiva, a triagem, o transporte e o processamento desses materiais, a fim de torná-los aptos a serem reintegrados na economia como matérias-primas. Além de proporcionar vantagens difusas para toda a sociedade, relacionadas à redução das externalidades negativas originadas pelo descarte final de resíduos provenientes de placas solares, a reutilização desses materiais também traz benefícios econômicos para o setor de reciclagem.

Os investimentos na cadeia de reciclagem e no reaproveitamento de resíduos criam numerosos empregos e contribuem para a circulação de riqueza na economia. Não por acaso que a PNRS reconhece os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis como um ativo econômico e social, uma fonte geradora de empregos, renda e cidadania. Para além disso, o reaproveitamento dos insumos utilizados para a sua fabricação inicial de placas solares representa uma iniciativa positiva com relação ao meio ambiente, visto que podem ser reaproveitados e continuarem os seus respectivos ciclos de vida, a partir da utilização para produzir novos produtos.

2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1. PLACAS SOLARES COMO IMPORTANTES FONTES DE PRODUÇÃO DE ENERGIA LIMPA

De início, cumpre destacar que o Sol é uma fonte perene, gratuita, não poluente de energia e responsável por todas as formas de energia do planeta (RIQUELME, 2008)³⁵.

O conceito de desenvolvimento sustentável é produto de uma avaliação das relações entre a sociedade e o meio ambiente, tratando-se de um processo contínuo e em constante transformação, por meio do qual se busca um equilíbrio entre as esferas social, ambiental e econômica (PEREIRA, 2017). Dentre os conceitos utilizados atualmente, o desenvolvimento sustentável pode ser entendido como “[aquele] que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”³⁶.

Implica, portanto, na perspectiva de garantir às pessoas, no presente e futuro, um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico, não se olvidando da preservação dos recursos naturais, bem como a fauna e a flora existentes. Nesse sentido, o desenvolvimento sustentável requer, de pronto, o reconhecimento de que os recursos são finitos, e, portanto, o planejamento para utilização destes é imprescindível.

O desenvolvimento econômico, tal qual o social, requerem uma demanda crescente de energia, e no Brasil a participação das hidrelétricas já se demonstrou, historicamente, como a base para a nossa geração de energia elétrica. Ocorre, todavia, que apesar de ser uma fonte renovável e abundante, assim como as demais fontes renováveis ela também está sujeita a fatores climáticos, de modo que a sua energia armazenada, entendida como o nível de água acumulada nos reservatórios, pode ser influenciada por períodos de estiagem intensos, prejudicando a segurança energética nacional.

³⁵ RIQUELME, Daniela Maria. A proteção do meio ambiente sobre a perspectiva das fontes alternativas de energia. 2008. 219 f. Dissertação (Mestrado em Direito) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2008.
<<https://sapientia.pucsp.br/bitstream/handle/8409/1/Daniela%20Maria%20Riquelme.pdf>> Acesso em 24.08.2023

³⁶ Associação de Jornalismo Digital - ECO. Dicionário Ambiental - O que é Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28588-o-que-e-desenvolvimento-sustentavel/>> Acesso em 24.08.2023

Em razão disso, em tempos de crise hídrica, há a ampliação de despachos – comandos para iniciar a geração de energia de fontes em que é possível o armazenamento, como biomassa, biogás, hidrelétricas, termelétricas - para fontes térmicas não renováveis, como óleo, carvão e gás natural, aumentando, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Não bastasse isso, as construções de usinas hidrelétricas comumente são objetos de críticas, uma vez que os impactos sociais e ambientais que delas decorrem podem ser devastadores, reverberando em comunidades vizinhas, no ecossistema local e alterando o ciclo hidrológico da área, por exemplo. Soma-se a isso o fato de que a capacidade de geração de energia elétrica das hidrelétricas vem caindo ano após ano, com uma redução aproximada de 20% ao total gerado se comparado aos últimos 10 anos³⁷ (TIEPOLO, 2016).

À medida que o mundo busca maneiras sustentáveis visando atender à crescente demanda energética, torna-se evidente que a energia solar se destaca como uma importante fonte de produção de energia, proveniente de um recurso abundante, não finito, capaz de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, criar empregos, fortalecer a segurança energética e impulsionar o desenvolvimento econômico. Nesse sentido, destaca-se a produção de energia a partir do sol como uma fonte, a princípio, bastante sustentável, uma vez que decorre do aproveitamento do calor e das irradiações provenientes da luz solar, sendo a produção em si dessa energia, limpa.

Não significa dizer, todavia, que a energia solar fotovoltaica é um tipo de energia 100% limpa e verde, ou de carbono zero, apesar da durabilidade dos painéis fotovoltaicos, quando considerada essa forma de aproveitamento do recurso Sol, ser de aproximadamente 30 anos. Isso porque a produção de painéis solares demanda a utilização de minérios como o cobre, o silício, a prata, o lítio, o níquel e o cádmio. Com o aumento da produção de painéis solares, também aumenta a demanda de retirada desses recursos do meio ambiente (NIERO, 2022)³⁸. O problema aqui não é, precipuamente, a utilização de recursos, mas os produtos consecutivos da atividade de mineração, que gera

³⁷TIEPOLO, G. M., URBANETZ, J., PEREIRA, E. B., PEREIRA, S. V., ALVES, A. R. Energia solar no Estado do Paraná - Potencial, barreiras e políticas públicas. X CBPE, Gramado, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308726807_ENERGIA_SOLAR_NO_ESTADO_DO_PARANA_-_POTENCIAL_BARREIRAS_E_POLITICAS_PUBLICAS> Acesso em 24.08.2023

³⁸NIERO, Thais. Ecycle website. Artigo: Energia solar é renovável ou não renovável?. 2022. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/energia-solar-e-renovavel-ou-nao-renovavel/>> Acesso em 24.08.2023

a poluição atmosférica, bem como a aquática, erosão e contaminação dos solos, para além dos prejuízos à biodiversidade e às populações locais.

Conforme destacado nos capítulos anteriores, a demanda energética está em constante crescimento e a Energia Solar Fotovoltaica vem acompanhando essa movimentação a cada ano, ampliando a sua participação no setor energético nacional e internacional. Com isso, o aproveitamento do recurso solar traz benefícios ao controle hídrico nos reservatórios de hidrelétricas, principalmente em períodos de seca, favorecendo o planejamento e a otimização de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia (PEREIRA, 2017).

Assim, sob a ótica do desenvolvimento sustentável, o aproveitamento das fontes de geração de energia solar propicia a promoção de estratégias que possam mitigar os riscos de uma insuficiência energética, aliado ao aumento de renda em regiões mais pobres do país, e que possuem um potencial solar muito favorável, como o caso do Nordeste, viabilizando uma economia socialmente mais justa e menos vulnerável aos fatores climáticos.

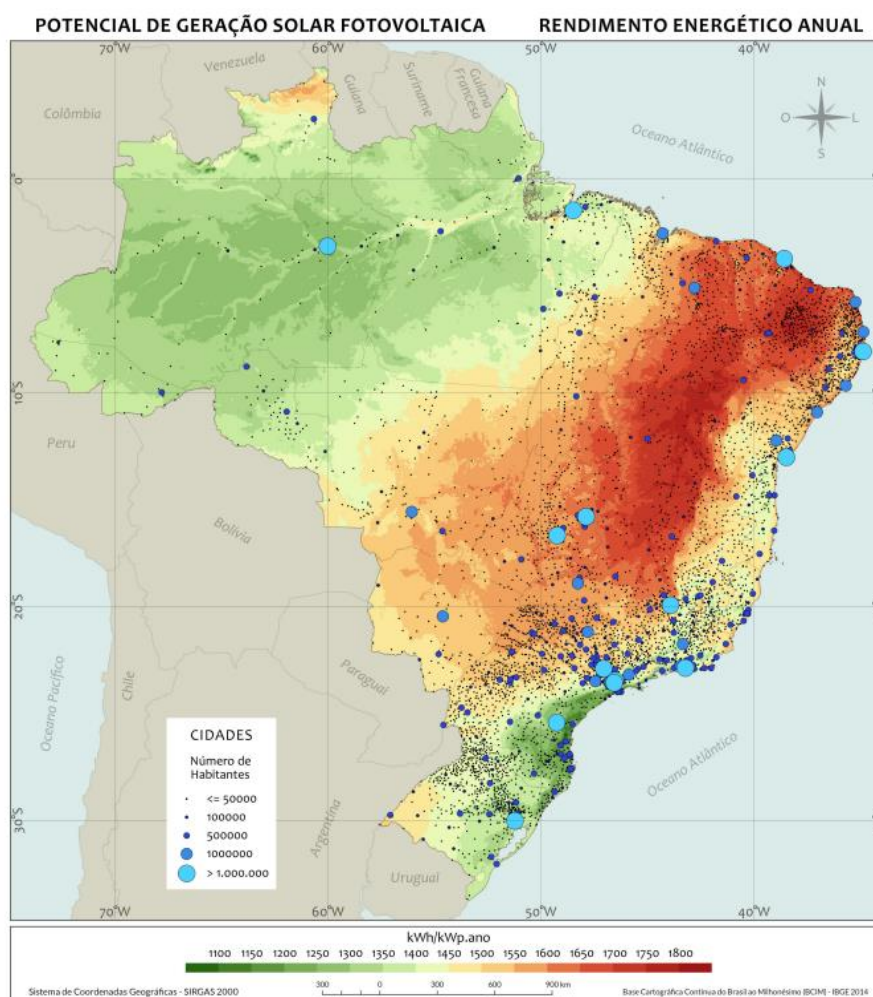
2.1.1. CRESCIMENTO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

De maneira simplificada, a produção de energia a partir desta fonte pode se dar de duas maneiras distintas, por meio da concentração de energia solar ou do efeito fotovoltaico. Nessa seara, a concentração de energia solar se faz através de espelhos, que irão aquecer um fluído de trabalho para produzir vapor a temperaturas elevadas, entre 150 e 1000 °C. Assim, o vapor gerado por essa ferramenta é utilizado para movimentar turbinas ligadas a geradores elétricos.

A segunda forma de se utilizar o Sol para a produção de energia elétrica se faz a partir da utilização de células fabricadas a partir de um material semicondutor que, ao ser exposto à luz, produz corrente elétrica. A produção de energia se dá a partir de grandes placas metálicas compostas por essas células fotovoltaicas, as quais irão promover a colisão dos fótons (partículas dos raios solares) com os átomos das placas, gerando corrente elétrica.

Conforme exposto anteriormente, o Brasil possui um alto potencial de geração de energia fotovoltaica, contando com níveis de irradiação solar muito favoráveis à utilização desta técnica. Nesse sentido, tem-se que no local menos ensolarado do Brasil é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha (PEREIRA, 2017).

Figura 01 - Gráfico de Potencial de Geração Solar Fotovoltaica



Fonte: PEREIRA, 2017

Ocorre que a produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos é bastante nova no país, na medida em que apenas em agosto de 2011 o Brasil colocou em funcionamento a sua primeira usina de energia solar fotovoltaica, localizada em Tauá, no Sertão dos

Inhamuns do Ceará. A eletricidade gerada à época, de 1 MW, era suficiente para abastecer 1.500 residências (ARCE, 2015)³⁹.

Nesse cenário, um importante marco para a difusão desta técnica de geração de energia foi a descentralização da produção de energia elétrica, a partir da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 já mencionada, a qual possibilitou ao consumidor brasileiro gerar a sua própria energia através de fontes renováveis (como energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada). Este mecanismo foi chamado de geração distribuída e foi acompanhado da institucionalização do sistema de compensação de energia elétrica, que consiste em integrar o excedente produzido por consumidores à rede de distribuição local, gerando créditos que poderão ser usufruídos para reduzir as próximas faturas.

A partir desse marco, fontes alternativas, tais quais a solar e a eólica, passaram a contar com incentivos fiscais, inclusive voltados à importação de insumos necessários à produção dos equipamentos, auxiliando na difusão e popularização principalmente de sistemas fotovoltaicos instalados em residências. Cumpre ressaltar que a instalação de sistemas fotovoltaicos não é barata, na medida em que exige um vultuoso investimento inicial para, em média, obter um *payback* entre 3 e 7 anos⁴⁰.

Apesar disso, é importante levar em conta, ainda, que o preço de módulos fotovoltaicos, considerados historicamente, vem sofrendo uma queda acentuada com o passar dos anos, com uma redução de 90% no valor dos equipamentos se comparados com os comercializados em 2010, contração esta impulsionada pela expansão mundial da energia solar aliada aos avanços tecnológicos. Atualmente, as células solares têm capacidade de aumentar a potência de saída do painel sem impactar nos custos de fabricação de maneira significativa, o que resulta num menor custo em moeda corrente por *watt*. Nessa esteira, os painéis solares estão mais resistentes e eficientes, pensados para terem uma vida útil mais ampla, que podem superar os 30 (trinta) anos⁴¹.

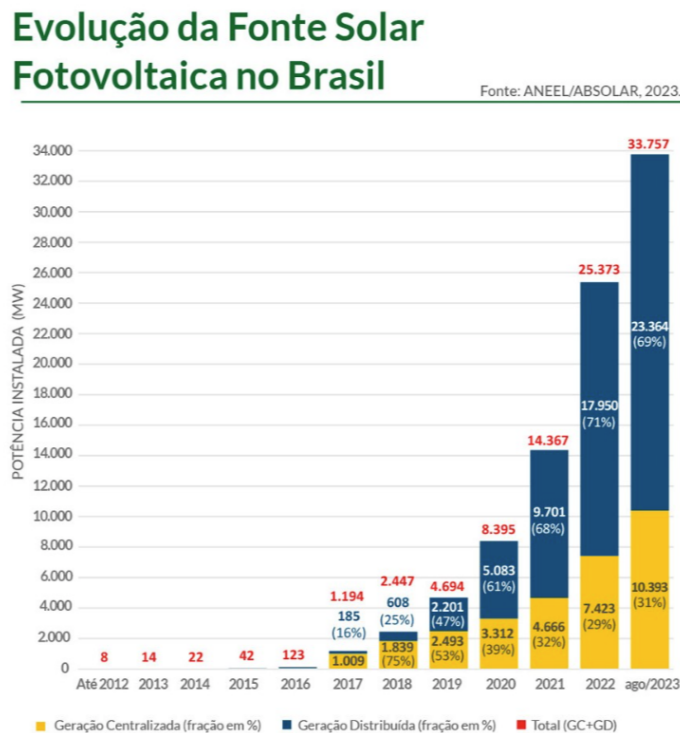
³⁹ AGÊNCIA REGULADORA DO ESTADO DO CEARÁ (ARCE). Usina localizada em Tauá é pioneira na geração de energia fotovoltaica. Publicação 2015. Disponível em: <<https://www.arce.ce.gov.br/2015/10/16/usina-localizada-em-taua-e-pioneira-na-geracao-de-energia-fotovoltaica/>> Acesso em 24/09/2023.

⁴⁰ Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - ABSOLAR. *Energia solar em casa leva de 4 a 7 anos para dar retorno; entenda*. 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-em-casa-leva-de-4-a-7-anos-para-dar-retorno-entenda/>> Acesso em 24.08.2023

⁴¹Portal Solar. Website. Matérias. *Preço dos painéis solares cai 90% em nove anos*. 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/preco-dos-paineis-solares-cai-90-em-nove-anos>> Acesso em 24.08.2023

Observa-se, então, a evolução da fonte solar fotovoltaica no país, a partir do infográfico elaborado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica⁴²:

Figura 02 - Infográfico “Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil”



Fonte: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

Conforme se vê, a energia solar fotovoltaica vem crescendo largamente no país, principalmente após 2015, ano em que a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 foi alterada visando aprimorar as regras do mecanismo da geração distribuída em favor do setor, por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015⁴³.

2.1.1.1. INSTALAÇÕES DE GRANDE PORTE E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

⁴² Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - colocar ref completa, link/de onde tirou essa figura

⁴³ Resolução Normativa ANEEL nº 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em <: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> > Acesso em 24.08.2023

Quanto à geração fotovoltaica, faz-se necessário realizar uma breve consideração acerca do processo de descentralização da geração de energia elétrica no país, com vistas a apresentar a atual conjuntura da produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos. Isso porque, no que concerne à utilização de painéis fotovoltaicos, existem duas formas de realizar essa geração, com as chamadas gerações centralizada ou distribuída.

A geração centralizada de energia elétrica se caracteriza por ser composta por usinas de fontes renováveis de grande porte, possuindo um alto valor agregado à sociedade. Significa dizer, então, que este modelo adota a criação de unidades geradoras capazes de produzirem energia em maior escala, impossibilitando que sejam localizadas dentro de centros urbanos. Essa característica, então, obriga que as grandes usinas, fontes de energia, fiquem distantes das unidades consumidoras, sendo necessário o transporte da carga gerada por meio de linhas transmissão mais altas e de alta tensão, até que possam chegar às redes de distribuição, ter sua tensão reduzida e, assim, satisfazer o consumidor final.

Tal processo, contudo, importa em perdas energéticas ao longo do caminho, uma vez que quanto maior o percurso que a energia gerada em usinas distantes tiver que fazer para chegar ao consumidor final, maior serão as perdas técnicas durante o trajeto. A perda é um fato inerente ao processo de transmissão de energia. Para que esta possa superar a distância que precisa, perde-se uma parte pela transformação em calor e pela resistência de transformadores.

Em se tratando de energia solar fotovoltaica, destacam-se duas maneiras de produção desta, a usina solar fotovoltaica tradicional, com painéis em terra e a usina solar flutuante. A primeira, conforme mencionado, se caracteriza pela implantação de parques solares destinados à produção de energia elétrica em terra, e se diferenciam de sistemas residenciais e industriais, uma vez que a sua energia é fornecida em alta tensão para distribuição e não para o autoconsumo.⁴⁴

Em sua grande maioria, as usinas solares fotovoltaicas são construídas sobre o solo, podendo ser fixas ou construídas com a utilização dos *trackers*, dispositivos que alteram

⁴⁴ O sol vai nascer amanhã: um espectro de análises sobre a energia fotovoltaica / [Coordenação Eloi Fernández y Fernández] 1. Ed – Rio de Janeiro: Lexikon: Instituto de Energia da PUC – Rio, 2020.

a posição dos painéis solares fotovoltaicos durante o dia, buscando seguir o caminho do sol para maximizar a produção de energia solar do sistema fotovoltaico.

As usinas flutuantes, por sua vez, se assemelham ao modelo discutido alhures, contudo a sua instalação se dá sobre as águas, como as das represas hidrelétricas, com vistas a aproveitar as instalações já existentes de linhas de transmissão para que possam levar a energia para os centros urbanos.

Importante notar, ainda, que projetos de grande porte normalmente importam em diversos impactos na localização a eles destinados, sendo eles de natureza econômica, social e ambiental. De acordo com Hernandez *et al.* (2014⁴⁵), os impactos que decorrem de usinas fotovoltaicas de larga escala variam no decorrer dos 25 a 40 anos que podem ficar em operação, e devem ser considerados os diferentes momentos dos parques solares, dentre a instalação, operação e desativação. Diversas são as perturbações ambientais que podem ser causadas pela instalação de tais plantas solares, como: alterações no efeito albedo, alterações na temperatura da superfície da terra, mudanças no microclima local e nas condições hidrológicas, alterações no regime de precipitação, promoção da erosão, produção de poeira, contaminação do solo, alteração na cobertura vegetal, invasão de plantas exóticas, perda de biodiversidade, poluição luminosa, supressão de habitat natural e desertificação.

Nesse sentido, comumente poderão ser solicitados estudos de impacto ambiental para que os projetos de implantação de usinas centralizadas sejam devidamente aprendidos para que se possa mitigar as externalidades negativas decorrentes dessa prática.

A segunda forma de produção de energia fotovoltaica, por sua vez, trata-se da geração distribuída. Esta caracteriza-se por ser a produção de energia elétrica em menor escala e em baixa tensão, pelas próprias unidades consumidoras, restritas à produção

⁴⁵ Hernandez, Rebecca & Easter, Shane & Murphy-Mariscal, Michelle & Maestre, Fernando & Tavassoli, M & Allen, E.B. & Barrows, Cameron & Belnap, J & Ochoa-Hueso, Raul & Ravi, Sujith & Allen, M.. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29. 10.1016/j.rser.2013.08.041.
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113005819?via%3Dihub> > Acesso em 26.08.2023

máxima de 5 MW para a energia solar, conforme disposição atualizada da Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023.⁴⁶

No Brasil, a definição de geração distribuída dada feita pelo Artigo 14 do Decreto-Lei n.º 5.163 de 2004⁴⁷:

“Considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento.”

A geração distribuída, em relação à geração centralizada, são usinas de pequeno porte e que abastecem a rede, injetando a sua produção diretamente no sistema de distribuição local. São sistemas que podem funcionar de maneira independente, visto que não demandam redes de transmissão, funcionam em baixa tensão, e, portanto, a energia gerada pode ser utilizada após a sua geração.

Ademais, tem-se como um fator que facilita a geração distribuída a partir de usinas fotovoltaicas o fato de que os painéis solares podem ser facilmente instalados em edifícios. Nesse sentido, a instalação de placas fotovoltaicas em telhados de prédios residenciais e comerciais vem se tornando uma prática cada vez mais comum, bem como qualquer outra superfície capaz de aguentar o peso das placas e que receba uma quantidade razoável de luz solar ao longo do dia.

Para se ter uma dimensão da importância que a energia solar fotovoltaica vem ganhando no Brasil, conforme destacou-se na figura 02 exposta acima, houve um crescimento total de 665% desde 2018, passando de 2.247 MW de potência instalada para 33.757 MW, em agosto de 2023. Desse valor final, destaca-se que a geração distribuída tomou a frente com 69% da capacidade instalada, demonstrando sua força no mercado interno.

⁴⁶ BRASIL. Resolução Normativa ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>> Acesso em 26.08.2023

⁴⁷ BRASIL. Decreto-Lei n.º 5.163 de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM> Acesso em 26.08.2023

2.2. PRODUÇÃO DE PLACAS SOLARES

Insta pontuar que nenhuma fonte de energia está livre de impactos ambientais, entretanto, frente a outras fontes de energia, principalmente comparada às de origem fóssil, a energia solar parece ser a menos lesiva ao meio ambiente.

A Resolução Conama nº 01/1986⁴⁸ define impacto ambiental da seguinte forma, *in verbis*:

“qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais:

A avaliação de impactos ambientais de determinada atividade deve ser precedida de estudos para identificar, prever, interpretar e prevenir as consequências ou os efeitos ambientais que determinadas ações, planos ou projetos podem causar à saúde, ao bem-estar humano e ao entorno - meio ambiente - (BOLEA, 1984). Nesse sentido, para que seja possível avaliar os impactos positivos e negativos da produção de energia fotovoltaica, é necessário que as diferentes fases de ciclo de vida de módulos fotovoltaicos sejam observadas, do berço ao túmulo (isto é, desde a aquisição de matérias primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final) (FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2020)⁴⁹.

A avaliação do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos inicia-se quando da sua fabricação, para que então possam ser direcionados para usinas solares, no caso da geração centralizada, ou pequenos terrenos e/ou edifícios para sua instalação, no caso da geração distribuída. Ao final da sua vida útil, deve-se levar em conta os diferentes processos de destinação, que também estão associados a variados impactos ambientais.

⁴⁸ BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - IBAMA. Resolução Conama nº 001 de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>> Acesso em 26.08.2023

⁴⁹ O sol vai nascer amanhã: um espectro de análises sobre a energia fotovoltaica / [Coordenação Eloi Fernández y Fernández] 1. Ed – Rio de Janeiro: Lexikon: Instituto de Energia da PUC – Rio, 2020.

De início, cumpre redizer que os módulos fotovoltaicos, para que possam gerar a energia, se utilizam de células fotovoltaicas, fabricadas a partir de um material semicondutor, as quais irão promover a colisão entre as partículas dos raios solares com os átomos das placas, gerando corrente elétrica. Atualmente o material mais utilizado para produção das células é o silício metalúrgico, produzido a partir de matérias-primas como o quartzo e o carvão.

Bezzerra *et al.* (2018), realizaram um extenso estudo acerca do processo de fabricação de módulos fotovoltaicos, no qual identificaram que os processos de maior demanda energética e que detêm uma maior participação nas categorias de impacto ambiental foram a produção do silício cirúrgico, com 47% e a produção do módulo fotovoltaico, com 21%. Deve-se considerar, ainda, que apesar de existirem outros materiais semicondutores disponíveis para a produção de células fotovoltaicas, o silício torna-se uma opção mais viável, uma vez que é o segundo elemento mais abundante no mundo, atrás do oxigênio, bem como carrega características que, quando trabalhadas, significam células de maior eficiência, menor custo e maior período que pode manter-se funcionando, de mais de 25 anos (Energy, U.S. GOV).

Conforme dito, as matérias primas utilizadas para a fabricação do silício metalúrgico - aquele que apresenta maior grau de pureza - na forma que deve ser utilizado em células se dá a partir de quartzo e carvão. Isso porque, basicamente, o “silício bruto” pode ser obtido a partir da sílica, encontrada no quartzo. Esta sílica necessita de um tratamento de redução (processo químico) a temperaturas que ultrapassam 1.500 graus célsius, momento em que será necessária a utilização do carvão. O resultado desse processamento é o silício metalúrgico.

São diversos os impactos ambientais negativos associados à extração do quartzo e do carvão, principalmente quando a extração dessas matérias depende muito da atividade mineradora.

Quanto aos impactos relacionados ao quartzo, pode se citar os seguintes (FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2020):

- a.** Remoção da vegetação em todas as áreas de extração;
- b.** Poluição dos recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) pelos produtos químicos utilizados na extração de minérios;
- c.** Contaminação dos solos por elementos tóxicos;
- d.** Proliferação de processos erosivos, sobretudo em minas antigas ou desativadas que não foram reparadas pelas empresas mineradoras;
- e.** Sedimentação e poluição de rios pelo descarte indevido do material produzido não aproveitado (rochas, minerais e equipamentos danificados);
- f.** Poluição do

ar a partir da queima ao ar livre de mercúrio (muito utilizado na extração de vários tipos de minérios); **g.** Evasão forçada de animais silvestres previamente existentes na área de extração mineral; **h.** Poluição sonora gerada em ambientes e cidades localizados no entorno das instalações; **i.** Contaminação de águas superficiais (doce e salgada) pelo vazamento direto dos minerais extraídos ou seus componentes; **j.** Degradação da paisagem e poluição visual; **k.** Geração de resíduos e disposição inadequada de rejeitos; **l.** Mortandade de peixes em áreas de rios poluídos pelos elementos químicos oriundos de minas; **m.** Risco de acidentes envolvendo barragens de rejeitos; **n.** Aumento expressivo da turbidez da água; **o.** Redução da disponibilidade de minerais.

Para os impactos relacionados à utilização de carvão, tornou-se necessário dividi-los em duas categorias, aqueles causados pelo carvão mineral, na sua exploração, preparação, utilização e transporte, quais sejam:

a. Drenagem ácida de minas - é comum em minas de carvão a liberação de ácido sulfúrico e ferro dissolvido; **b.** A poluição do ar nas minas de carvão se deve principalmente às emissões de material particulado e gases como o CH₄, SO₂, NO_x e CO; **c.** A poluição do ar das usinas de carvão é causada pela liberação de gases como SO₂, NO_x, material particulado e metais pesados, levando à poluição atmosférica, chuva ácida, toxinas no ambiente e inúmeros efeitos respiratórios e cardiovasculares; **d.** Incêndios de carvão podem ocorrer em minas de carvão abandonadas e pilhas de resíduos de carvão; **e.** Geração de resíduos como cinzas volantes, cinzas de fundo e lodo de dessulfuração de gases de combustão, que contém mercúrio, urânio e outros metais pesados; **f.** Remoção da vegetação em todas as áreas de extração e poluição visual; **g.** Evasão forçada de animais silvestres previamente existentes na área de extração mineral.

O carvão vegetal, por sua vez, é fruto da queima ou carbonização da madeira. Os impactos relacionados à sua produção, entretanto, podem ser divididos entre positivos e negativos, conforme descrito a seguir (RODRIGUES, 2016)⁵⁰:

Negativos: **a.** Desmatamento - a utilização da madeira para a produção de carvão vegetal é muitas vezes proveniente de floresta nativa; **b.** Desapropriação de terras para cultivos destinados a este fim; **c.** Extinção de espécies nos locais de plantio; **d.** Proliferação de pragas; **e.** Elevação de temperaturas locais e regionais; **f.** Empobrecimento do solo e aumento de processos erosivos; **g.** Diminuição dos índices pluviométricos; **h.** Assoreamento de rios e lagos; **i.** Poluição atmosférica com a queima da madeira para obtenção do carvão vegetal; **j.** Riscos à saúde humana - para a mão de obra que fica diariamente exposta às fumaças dos fornos e para os moradores dos arredores. **Positivos:** **a.** Possibilidade de fácil adaptação do eucalipto a diversas regiões; **b.** A forma como é realizado o plantio desta cultura, permite a criação de corredores ecológicos interligando fragmentos de matas nativas; **c.** Possibilidade de devolução de até 30% de nutrientes (como P, K, Ca e N) do solo se as cascas, folhas, galhos e raízes do eucalipto

⁵⁰ RODRIGUES, T.I. Diagnóstico ambiental da produção de carvão vegetal no município de Tabai – RS. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Ambiental. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, do Centro Universitário Univates: Lajeado, RS, 2016, p.88.

forem deixadas no local de colheita; a utilização de carvão vegetal desloca uma demanda que seria atendida por recursos fósseis.

Interessante notar, ainda, que a utilização de carvão vegetal, apesar de apresentar mais pontos negativos do que a utilização do carvão mineral, possui impactos menos nocivos ao meio ambiente, razão pela qual sua utilização é preferível e mais vantajosa ao carvão mineral.

Extraídas as matérias primas para fabricação do silício, a produção do silício metalúrgico também importa em impactos ao meio ambiente, tais quais (FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2020):

a. Geração de efluentes líquidos industriais; **b.** Geração de efluentes líquidos sanitários; **c.** Geração de efluentes líquidos de águas pluviais; **d.** Geração de resíduos sólidos; **e.** Geração de ruídos; **f.** Risco de incêndios; **g.** Geração de subprodutos - escória da produção de Si-GM. Quando é utilizado para algum fim, como para fazer peças de fundição de aço, é considerado um impacto positivo; **h.** Geração de emissões atmosféricas.

Mas não é só. Quando pronto o material que irá compor as células fotovoltaicas, deve-se levar em consideração, ainda, que todas as etapas de corte, fatiamento, e polimento das células envolvem a emissão de muitas partículas e componentes químicos com alto grau de potencial poluidor, bem como do manejo dos materiais que serão utilizados para a efetiva montagem dos módulos (FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2020):

a. Geração de resíduos - serrar os cilindros c-Si para a fabricação das lâminas cria uma quantidade significativa de resíduos de pó de silício (pode haver perda de até 50% do material, que será emitido para o ar e a água utilizada para enxaguar as células); **b.** Utilização de alumina - o polimento mecânico utiliza a alumina, tem que ter um manuseio especial, armazenamento e descarte adequado; **c.** Utilização de hidróxido de sódio e de potássio - a etapa de lavagem química libera grandes quantidades desses hidróxidos. Estes produtos químicos cáusticos são perigosos para os olhos, pulmões e pele; **d.** Utilização de chumbo na interligação de circuitos eletrônicos e da fiação; **e.** Utilização de prata e alumínio para fazer os contatos elétricos das células.

Observa-se, portanto, que a energia produzida para a produção de painéis solares é proveniente de fontes não-renováveis, tendo como destaque as fontes derivadas de recursos fósseis (95% de contribuição total) (BEZERRA, 2018). Apesar disso, Bezerra

et. al (2018) demonstraram que o tempo de retorno de energia estimado após colocar um painel solar em funcionamento é de 2,94 anos, o que se mostra promissor ao setor.

Isso porque, em que pese os processos para obtenção da matéria prima dos módulos fotovoltaicos importarem em uma série de efeitos negativos ao meio ambiente, desde a extração dos materiais até que sejam colocados em uso, deve-se levar em consideração que os módulos, durante os aproximados 30 anos que ficarão em funcionamento, produzirão energia a partir de uma emissão 0 (zero) de CO₂.

Nesse sentido, observa-se que o aumento da eficiência, combinado com a redução no preço das placas fotovoltaicas, resultam em uma utilização cada vez maior desta fonte de energia, aumentando a sua participação na matriz elétrica nacional e mundial todos os meses. Frente esse crescimento acelerado, não se pode deixar de considerar que a produção de placas solares importa, igualmente, na produção de componentes tóxicos que exigem seja dado o devido retorno a esses materiais ao final de seu ciclo de vida.

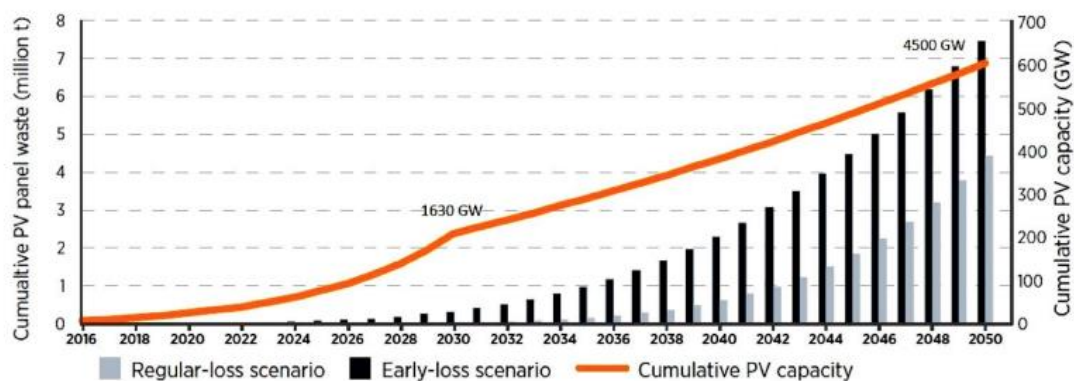
N.M. De Sousa *et al.* (2023)⁵¹, alertam que a capacidade instalada mundial de energia elétrica fotovoltaica, em 2017, atingiu a marca de 400 GW, e espera-se que este número chegue a 4.500 GW até 2050. Tal número, no entanto, representa uma produção acumulada de aproximadamente 78 milhões de toneladas de resíduos (CHOWDHURY *et al.*, 2020)⁵² e que deverão ser levados em consideração à medida que essa fonte de energia se expande. Conforme se depreende do gráfico a seguir:

⁵¹ DE SOUSA, Nelson Monteiro; OLIVEIRA, Clóvis Bosco; CUNHA, Darliane. *Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles*, Social Sciences & Humanities Open, Volume 7, Issue 1, 2023, 100456, ISSN 2590-2911. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456>>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259029112300061X>> Acesso em 10.09.2023

⁵² CHOWDHURY, S., RAHMAN, K., CHOWDHURY, T., NUTHAMMACHOT, N., TECHATO, K., AKHTARUZZAMAN TIONG, S., SOPIAN, K., & AMIN, N. *An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling*. Energy Strategy Reviews, 27, Article 100431. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>> Acesso em 10.09.2023

Figura 03 – Estimativa de resíduo solar fotovoltaico no mundo entre 2016-2050 (em toneladas)



Fonte: Chowdhury et al., 2020.

2.3. DESCARTE DE PLACAS SOLARES

Conforme discutido acima, os módulos fotovoltaicos possuem uma vida útil de aproximadamente 30 anos, tempo este que, uma vez transcorrido, a produção de energia do painel será pelo menos 80% da potência original (FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2020). Não obstante os avanços tecnológicos que estão sendo observados para com este tipo de tecnologia, considerada uma fonte de energia verde e sustentável, a sua produção resulta em uma grande demanda por metais e demais materiais para a produção das células fotovoltaicas, o que, conseqüentemente, resulta na produção de lixo eletrônico, causando um problema futuro com relação ao seu descarte.

Em se tratando do Brasil, tem-se que grande parte dos módulos aqui instalados ainda não atingiram este prazo, mas em breve atingirão, e, por mais que nem todos devam ser substituídos de pronto, é de rigor que se desenvolvam políticas e métodos para que o seu descarte seja cada vez mais eficaz e menos nocivo ao meio ambiente. A disposição incorreta desse tipo de material pode representar um alto risco à saúde, humana e biota, de forma que a extração de materiais, o tratamento correto dos resíduos produzidos e opções para se recuperar a pureza dos materiais secundários utilizados em sua fabricação, deverão ser contabilizados para que a indústria de produção de energia fotovoltaica possa

produzir uma energia renovável, sustentável e facilitar a descarbonização da matriz elétrica mundial⁵³ (BARTIE *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a adoção dos princípios da economia circular tem o condão de auxiliar na redução de fatores ambientais como emissões advindas da sua produção, bem como aumentar a reciclagem e a taxa de recuperação das matérias-primas inicialmente utilizadas⁵⁴ (FARRELL *et al.* 2020). Métodos de controle da produção desta categoria de lixo devem ser desenvolvidos e incentivados para que a tais resíduos seja dada a destinação mais adequada e responsável. A falta de ações que buscam desenvolver estratégias para tanto, pode resultar, em um futuro não tão distante, em consequências ambientais bastantes sérias, representando alto risco para a saúde humana (Li et al., 2022)⁵⁵.

Para além dos benefícios ambientais da reciclagem e do reaproveitamento dos recursos que compõe as placas fotovoltaicas, não se pode olvidar o valor econômico dado aos resíduos sólidos desta categoria, tendo em vista os valiosos materiais que as compõem e que em grande parte podem ser recuperados. Isso porque, conforme estudo realizado por Gautam *et al.* (2022)⁵⁶, o valor agregado a resíduos solares pode chegar a 70% do valor de mercado destes painéis.

⁵³ BARTIE, N. J., COBOS-BECERRA, Y. L., FROHLING, M., SCHLATMANN, R., & REUTER, M. A. *The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities*. Resources, Conservation and Recycling, 169, Article 105516. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105516>> Acesso em 10.09.2023

⁵⁴ FARRELL, C. C., OSMAN, A. I., DOHERTY, R., SAAD, M., ZHANG, X., MURPHY, A., HARRISON, J., VENNARD, A. S. M., KUMARAVEL, V., AL-MUHTASEB, A. H., & ROONEY, D. W. *Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 128. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>> Acesso em 10.09.2023

⁵⁵ Li, Yan, Zhang, Li, Wang, Ge, & Lu, Xi (2022). Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. Resources, Conservation and Recycling, 180. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106165>> Acesso em 10.09.2023

⁵⁶ Gautam, A., Shankar, R., & Vrat, P. (2022). Managing end-of-life solar photovoltaic ewaste in India: A circular economy approach. Journal of Business Research, 142, 287–300. <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.034>> Acesso em 10.09.2023

2.3.1. IMPACTOS AMBIENTAIS

Conforme estudado por Xu *et al.* (2018)⁵⁷, a falta de planejamento e estudo na disposição final de módulos fotovoltaicos pode resultar em diversos produtos indesejados e nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Assim, foram descritos alguns dos perigos à correta disposição, tais como o vazamento de elementos químicos perigosos aos seres vivos, como o chumbo e cádmio e perdas de metais raros, *e.g.* prata, índio, gálio, germânio e paládio, bem como perdas de outros materiais recuperáveis que não são tão raros, mas que ainda têm valor econômico agregado, como o alumínio, o silício e o vidro.

Os metais raros que compõem os módulos fotovoltaicos, ainda, demandam um tratamento especial e manejo específico em processos de reciclagem. Por se tratar de materiais que comumente não se encontram em grande concentração nos módulos, o processo para a sua recuperação é bastante dificultoso e, conseqüentemente, lento, de modo que se apresenta a seguinte questão: como manejar tais materiais com a eficiência necessária à medida em que os volumes de placas fotovoltaicas produzidas vem crescendo exponencialmente?

Para ilustrar essa problemática, Sharma *et al.* (2019)⁵⁸ consideraram dois cenários possíveis com relação à geração de resíduos provenientes da obsolescência de placas solares fotovoltaicas. O primeiro, considerou o ciclo de vida regular dos painéis, sem que houvesse perdas de equipamentos prematuramente, ao passo que o segundo cenário considerou perdas prematuras, decorrentes das mais variadas razões, tais como problemas no transporte, falhas prematuras nos módulos, perdas operacionais causadas por eventos climáticos, entre outros.

Para o primeiro caso, a geração regular de resíduos, para 2030, foi estimada em 1.7 milhões de toneladas, ao passo que, para 2050, estimou-se a produção acumulada de 60 milhões de toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos. A hipótese que considerou

⁵⁷ Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75, 450–458. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>> Acesso em 10.09.2023

⁵⁸ Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 8 (5), 597–610. <<https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610>> Acesso em 10.09.2023

perdas prematuras dos componentes fotovoltaicos, por outro lado, estimou a produção de 8 milhões de toneladas de resíduos até 2030 e 78 milhões de toneladas atingidas em 2050.

Essas estimativas, portanto, demonstram o grau de dificuldade que o Brasil e o mundo irão enfrentar ao endereçar essa questão. Dada essa situação, é importante considerar que ainda temos a oportunidade de desenvolver o potencial de mercado destinado ao transporte, empacotamento, reparação, reutilização, reciclagem e demais processos que buscam dar uma destinação adequada a tais resíduos ao final de sua vida útil.

Nesse sentido, é de grande importância o fomento a investimentos que possam aumentar a eficiência e a tecnologia envolvida em processos de desmonte desses módulos, para que seja possível aumentar a capacidade de processamento de placas fotovoltaicas obsoletas e segregar a maior parte dos materiais em tempo hábil, de modo que o descarte futuro não se apresente como um problema tão grande quanto é enxergado hoje. Isso porque, mesmo considerando que o atual descarte de placas fotovoltaicas não reflete o montante que futuramente será descartado todos os anos, apenas 10% de todos os painéis fotovoltaicos são reciclados mundialmente.

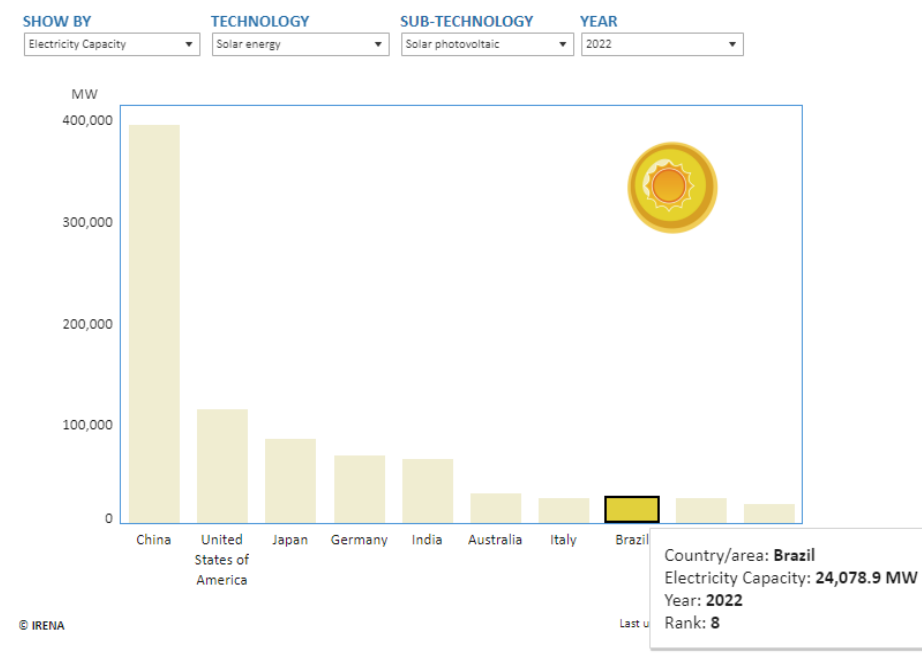
Haja vista que este é um problema emergente e que poucos países possuem uma regulamentação sólida para tratar de painéis fotovoltaicos com seus respectivos de vida expirados, tem-se que os resíduos destes equipamentos são tratados, erroneamente, como resíduo domiciliar comum, como lixo eletrônico em geral ou, ainda pior, não são tratados de nenhuma forma (N.M. De Sousa *et al.*, 2023). Difere-se do resto do mundo a Europa, que definiu os resíduos fotovoltaicos como REEE (resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, bem como estabeleceu a diretiva REEE (DIRETIVA 2012/19/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO)⁵⁹, em que foi determinada a criação de um sistema de gerenciamento para a destinação final dos resíduos sólidos desta natureza, objetivando a minimização de impactos ambientais significativos e danos à saúde humana.

Cumprir destacar, ainda, que o Brasil, na qualidade de um dos 10 países com maior potência instalada de fonte solar fotovoltaica no mundo (IRENA, 2023), possui uma

⁵⁹JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19 do Parlamento Europeu E do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). 2012. Disponível em: < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>> Acesso em 10.10.2023

classificação e modelo de gestão de resíduos de placas fotovoltaicas ainda não muito desenvolvida, mas que busca endereçar essa questão, a partir da implementação da logística reversa.

Figura 04 – Ranking de países com maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica



Fonte: IRENA, 2023⁶⁰

A logística reversa, como já visto, é compreendida como uma ferramenta composta pelo conjunto de ações envolvendo o sistema de coleta, transporte, armazenamento, reciclagem e tratamento de produtos descartados no pós-consumo, apresentando-se como um instrumento que pode auxiliar na correta destinação dos resíduos produzidos a partir da inutilização de módulos fotovoltaicos. Não à toa, em 2020 foi editado o Decreto nº 10.240/2020⁶¹, por meio do qual regulamentou o inciso VI

⁶⁰International Renewable Energy Agency. *Country Rankings*. Disponível em: <<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>> Acesso em 10.08.2023

⁶¹BRASIL. Decreto nº 10.240 de 12 de fevereiro de 2020. (...) quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm> Acesso em 10.08.2023

do *caput* do art. 33 e o art. 56 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, referente à implantação do sistema de logística reversa de produtos eletrônicos e seus componentes de uso doméstico.

2.3.2. DECRETO Nº 10.240/2020

Conforme já discorrido, a Lei nº 12.305/2010 tratou de instituir uma Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, marco regulatório nacional voltado ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

O relatório anual da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE)⁶², que reúne empresas de gestão de resíduos urbanos, o ano de 2022 testemunhou a produção de aproximadamente 81,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos (ABRELPE, 2022). Ao longo de uma década, a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos cresceu 17,9%, o que representa praticamente o dobro da taxa de crescimento populacional do Brasil no mesmo período, registrando 8,9% (N.M. De Sousa et al., 2023).

De acordo com o mesmo relatório da ABRELPE, houve um aumento notável nas taxas de coleta seletiva nos últimos anos, passando de 56,6% em 2010 para 75,1% em 2021. No entanto, cumpre destacar que existem disparidades consideráveis entre diferentes regiões do país. Em contrapartida, ao longo da última década observou-se um aumento apenas marginal nos valores percentuais de destinação adequada, com o Brasil destinando corretamente 61% de seus Resíduos Sólidos Urbanos em relação ao total gerado.

Em se tratando de resíduos eletrônicos, os dados no contexto nacional são limitados. Apesar disso, estudos elaborados pelo Global Waste Monitor (2020) estimam que tenham sido gerados aproximadamente 2,143 milhões de toneladas de resíduos sólidos eletrônicos no Brasil, correspondente a uma média de 10,2 kg de resíduos eletrônicos gerados *per capita*, maior do que a média global de 7,3 kg.

⁶² ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em 14.10.2023

Com vistas a endereçar a questão da logística reversa com enfoque específico na implementação do sistema de logística reversa para produtos eletrônicos e seus componentes de uso doméstico, conforme estabelecido na Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, foi editado o Decreto nº 10.240/2020, o qual desempenha um papel importante ao regulamentar a gestão de resíduos sólidos de lixo eletrônico.

Objetiva-se, então, imputar para todos os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, que também passam a ter que estabelecer e implementar sistemas de logística reversa de seus resíduos eletroeletrônicos de forma independente do sistema de coleta público.

Assim, determinou-se que a implementação da logística reversa para esse fim deverá ser integralmente financiada pelas empresas, na proporção correspondente às suas participações no mercado. Ademais, o decreto estabelece que é obrigação dos fabricantes e importadores assegurar uma disposição final ambientalmente apropriada para todos os resíduos que entram no sistema, com prioridade dada à reciclagem. Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabeleça uma hierarquia na gestão de resíduos sólidos que deve ser seguida, importante destacar que existe uma preferência pela reciclagem⁶³ devido às especificidades e desafios associados à reutilização de produtos eletroeletrônicos. No entanto, se a reutilização for uma opção viável, as empresas devem considerá-la sem hesitação como uma forma de destinação.

Adotando uma estratégia muito similar com aquela utilizada pela Europa, via diretiva REEE 2012/19, não foi estabelecido uma norma específica para endereçar a logística reversa de painéis solares fotovoltaicos, mas a inclusão destes dentro do escopo legal de lixo eletrônico. Nesse contexto, o decreto estabelece prazos e responsabilidades para fabricantes, importadores, distribuidores e consumidores, bem como metas a serem atingidas visando implementar gradativamente a logística reversa a nível nacional.

Nesse sentido, o país já conta com iniciativas que buscam implementar o sistema de logística reversa nos termos do Decreto, como é o caso da Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (“ABREE”), destinada a definir e realizar a gestão da logística reversa de produtos eletroeletrônicos e eletrodomésticos pós-consumo no Brasil, visando dar a destinação final adequada a essa classe de resíduos.

⁶³ art. 33, I, do Decreto nº 10.240/2020.

Deste modo, a ABREE fica responsável pela contratação, fiscalização e auditoria dos serviços prestados por terceiros, para a implementação de sistemas coletivos de logística reversa.

Segundo o 1º Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa de Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico, elaborado pela ABREE⁶⁴, em 2021 foram contabilizadas 1.245 toneladas de resíduos eletrônicos e eletrodomésticos, o que corresponde a apenas 11,4% da meta estabelecida pelo cronograma de implantação de logística reversa previsto no Anexo II, do Decreto nº 10.240/2020, correspondente a 1% da quantidade em peso colocada no mercado.

Quando se trata da implementação da logística reversa destinada a painéis solares fotovoltaicos, um ramo ainda pouco explorado no Brasil, foi identificada apenas uma empresa dedicada à logística reversa de módulos fotovoltaicos no país, esta pioneira da atividade na América Latina – a SunR. Fundada em janeiro de 2020, a companhia se dedica ao processamento de painéis fotovoltaicos, contudo, conforme exposto pelo seu fundador, em entrevista dada ao NeoFeed⁶⁵, o seu processo de desmanche é basicamente mecânico, por meio do qual retira o alumínio das placas, etapa mais fácil do processo, e, após, tritura os demais componentes.

Após triturados, os materiais são separados conforme suas densidades e constituições, a fim de serem encaminhados para diferentes indústrias que conseguem utilizar deles para desenvolver outros produtos. Leonardo Gianini Duarte, o idealizador do projeto, explica que o alumínio pode ser utilizado para virar esquadrias de portas e janelas, por exemplo; ao passo que o vidro fotovoltaico, por exemplo, poderá ser incorporado a tintas, usadas para sinalização rodoviária. Observa-se, então, que os processos de logística reversa são implementados, na medida em que a matéria prima é utilizada para a elaboração de novos produtos, não sendo necessária a extração de novas substâncias para o seu desenvolvimento, senão a sua reutilização.

Assim, o processo de tratamento da SunR. afirma conseguir uma eficiência de reciclagem de até 92%, número que representa uma menor extração de materiais e,

⁶⁴ABREE. Associação Brasileira de Reciclagem de Eletrônicos e Eletrodomésticos. 2022. Disponível em: <<https://abree.org.br/pagina/download/6323>> Acesso em 16.10.2023

⁶⁵PASTORE, Karina. Empresa brasileira quer capturar as placas de energia solar que viram lixo. NeoFeed, 2023 <<https://neofeed.com.br/inovacao/empresa-brasileira-quer-capturar-as-placas-de-energia-solar-que-viram-lixo/>> Acesso em 16.10.2023

consequentemente, inserção deles mais uma vez em diferentes (ou iguais) cadeias produtivas.

Não se pode deixar de considerar que o Decreto, na forma em que foi pensado, elaborado e editado, apenas compreende a implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico, isto é, destinado ao uso próprio ou pessoal, residencial ou familiar, exclusivamente por pessoa física, dos produtos eletroeletrônicos de que trata o Decreto. Significa dizer, então, que os resíduos abarcados pela geração distribuída fazem parte do plano de destinação final, entretanto, os resíduos da geração centralizada, ou seja, de usinas de grande porte, permanecem sem um respaldo regulatório para promover o gerenciamento dos resíduos sólidos fotovoltaicos produzidos por essas.

Não à toa essa questão já foi levada ao Senado Federal, por meio do PL 3.784/2023⁶⁶, a partir do qual o senador Carlos Viana (Podemos – MG) defendeu a inclusão da obrigatoriedade de institucionalizar a logística reversa de painéis solares fotovoltaicos diretamente na Política Nacional de Resíduos Sólidos, por entender que este não deve ser um processo restrito a componentes eletrônicos domésticos, como placas solares que integram sistemas de geração distribuída, mas que deve abranger toda a cadeia de painéis fotovoltaicos utilizados e descartados no Brasil, provenientes também da geração centralizada. Assim, além da obrigatoriedade de estruturar e implementar sistemas de logística reversa para os demais componentes previstos pelo art. 33, da PNRS, foi proposta a inclusão de um 7º inciso, exclusivo aos módulos fotovoltaicos. ⁶⁷

⁶⁶ https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/158987?_gl=1*1vmvoy2*_ga*MjA4NjA0OTUxNi4xNjkyNjQwMjcjcx*_ga_CW3ZH25XMK*MTY5NzUxNzk4OS41LjEuMTY5NzUxODA4NC4wLjAuMA..

⁶⁷ Art. 33., da Lei nº 12.305/2010 - “São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de: I - agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas; II - pilhas e baterias; III - pneus; IV - óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes.”

2.3.3. REGULAMENTAÇÃO EUROPEIA DESTINADA À LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Pioneira na regulamentação responsável por destinar os resíduos provenientes de placas solares fotovoltaicas, a União Europeia, já em 2012, colocou em vigor a Diretiva 2012/19/EU, por meio da qual estabeleceu uma política ambiental relativa ao tratamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Baseada nos princípios da precaução, da ação preventiva, da correção, dos danos causados ao ambiente e do poluidor-pagador, a Diretiva foi pensada para contribuir para uma produção e um consumo sustentáveis, mediante a prevenção de se produzir REEEs por meio de processos de *“reutilização, reciclagem e outras formas de valorização desses resíduos, de modo a reduzir a quantidade de resíduos a eliminar e a contribuir para a utilização eficiente dos recursos e a recuperação de matérias-primas secundárias valiosas.”*⁶⁸.

Nessa toada, os painéis fotovoltaicos foram classificados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e estão sujeitos a um tratamento para que possam alcançar um nível satisfatório de reaproveitamento, nos termos do art. 5º, I, da Diretiva, *in verbis*:

“1. Os Estados-Membros devem tomar medidas adequadas para reduzir a eliminação de REEE sob a forma de resíduos urbanos não triados, para assegurar o correto tratamento de todos os REEE recolhidos e para alcançar um elevado nível de recolha seletiva de REEE, em especial e prioritariamente no que respeita aos equipamentos de regulação da temperatura que contêm substâncias que empobrecem a camada de ozono e gases fluorados com efeito de estufa, às lâmpadas fluorescentes que contêm mercúrio, aos painéis fotovoltaicos e aos equipamentos de pequenas dimensões referidos nas categorias 5 e 6 do Anexo III”

Assim como replicado pelo Brasil quando da edição da Lei nº 12.305/2010, a Diretiva também tratou de responsabilizar a todos da cadeia produtiva pela implementação e efetivação do sistema de logística reversa, inclusive o consumidor. Com base nos princípios de responsabilidade estendida do produtor, a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos da União Europeia estipula que os fabricantes de

⁶⁸ Consideração 7ª, Diretiva 2012/19/EU

painéis solares, independentemente de sua localização, devem financiar os custos de coleta e reciclagem dos painéis no final de sua vida útil, quando estiverem instalados no continente europeu. Essa combinação de responsabilidade legal do fabricante no final da vida do produto, juntamente com metas específicas de coleta, recuperação e reciclagem, bem como requisitos mínimos de tratamento, pode contribuir para a proteção do meio ambiente e da saúde humana. Esses elementos podem servir como diretrizes para o desenvolvimento da regulamentação dos resíduos gerados pelo setor.

Com experiência no setor, bem como no manejo de resíduos sólidos, a PV Cycle, uma organização sem fins lucrativos, fundada em 2007, tem o objetivo de gerenciar a disposição de resíduos eletrônicos, principalmente quando se trata de módulos fotovoltaicos. A partir da tecnologia desenvolvida pela organização, em 2016, a PV Cycle atingiu a marca de reciclagem de 96% dos módulos fotovoltaicos, o que representa uma economia de energia e matéria prima muito positiva ao meio ambiente.

CONCLUSÃO

De proporções continentais e com um potencial de exploração de usinas de geração de energia renovável extremamente favoráveis, o Brasil sempre esteve em posição de vanguarda quando se trata de sua matriz elétrica. Ainda na época do Império já há registros da utilização de força da água para geração de eletricidade, fato que incentivou diversas outras regiões do país a explorarem as fontes naturais para a conversão em energia.

Não à toa que o país está entre um dos maiores produtores de energia elétrica a partir de fontes renováveis do mundo, na qual tem sua oferta interna em 88%. O resto do mundo se utiliza majoritariamente de fontes não renováveis, representando de 71% da oferta global, demonstrando a disparidade entre a energia produzida nacionalmente e internacionalmente.

Não se pode deixar de observar, ademais, que o Brasil possui uma área de incidência de sol bastante favorável para a exploração do seu potencial fotovoltaico, no qual o seu local menos ensolarado consegue gerar mais eletricidade a partir do efeito fotovoltaico que o local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo. Apesar disso, a geração de energia elétrica fotovoltaica no país é bastante nova, à medida em que foi introduzida a primeira vez no país apenas em 2011, ao passo que o consumidor pôde produzir a sua própria energia somente no ano seguinte, a partir da edição da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que auxiliou na difusão de fontes alternativas, como a solar fotovoltaica.

Ocorre, todavia, que até publicação da Resolução supracitada, a produção de módulos fotovoltaicos era pequena, fato que impedia muitos consumidores de pensarem em comprar um sistema fotovoltaicos em razão dos preços praticados à época. Com a difusão gradativa de sistemas de geração de energia fotovoltaica, bem como com os avanços tecnológicos que aumentaram a eficiência de módulos como esses, tem-se que a consequência disto foi o barateamento sucessivo de placas solares fotovoltaicas, permitindo que cada vez mais pessoas tenham acesso a esse tipo de tecnologia. Cumpre lembrar que desde 2010 houve uma redução de aproximadamente 90% no valor dos equipamentos que compõe os módulos.

Não bastasse isso, as políticas de incentivo nacionais à utilização de sistemas de geração de energia elétrica alternativos foram decisivas para estimular que cada vez mais pessoas, naturais e jurídicas, se aproveitassem dessa fonte de energia para, além de baratarem a conta de luz no longo prazo, contribuírem para uma transição energética de geração de energia de baixo carbono.

Se, de um lado, a produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos se apresenta como uma fonte de baixo carbono – enquanto produzindo energia durante os seus mais de 30 anos de vida útil -, de outro não podemos esquecer que a produção, bem como o descarte envolvido desses materiais, não estão livres de impactos ambientais significativos. Dar a destinação adequada para esses painéis, visa minimizar os riscos à saúde humana e do meio ambiente, bem como os impactos que decorrem da extração, implementação e descarte de todos os materiais que compõe um painel solar.

Conforme exposto nas seções anteriores, o setor de energia solar fotovoltaica nacional tem experimentado um crescimento notável nos últimos anos, com perspectiva de seguir crescendo. O número de usinas, abrangendo desde pequenos projetos em geração distribuída até grandes centrais de geração, tem aumentado significativamente. Diante desse cenário, é imperativo planejar minuciosamente a gestão de equipamentos fotovoltaicos quando estiverem obsoletos. Isso envolve a busca por alternativas para a implementação de programas que incentivem a destinação apropriada desses dispositivos, a investigação das melhores soluções para a utilização dos recursos, a recuperação do valor dos materiais contidos nos módulos, e a adoção de procedimentos adequados para o descarte responsável dos materiais que não possam ser recuperados.

Nesse sentido, a falta de planejamento e estudo na disposição final de módulos fotovoltaicos pode resultar em diversos produtos indesejados e nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, de modo que a implementação de um sistema de manejo, desde a coleta até a disposição o final, tem muito a crescer para a conservação do meio ambiente. O compartilhamento da responsabilidade por todos os agentes envolvidos em uma cadeia produtiva nada mais é uma medida necessária à preservação do meio ambiente e à tentativa de garantias para que a sociedade de amanhã possa usufruir de tudo que a de hoje pôde, visando um desenvolvimento sustentável.

Apesar do mercado de energia fotovoltaica ser relativamente novo no Brasil, fato é que este vem crescendo a passos largos nos últimos anos, o que faz com que a instalação

de módulos venha aumentando ano após ano, conforme se vê na Figura 2 deste trabalho. Assim, em que pese a extensa vida útil dos módulos, certo é que não só o tempo é responsável por inutilizá-las, estando exposta a outros fatores que acabam por deixá-las obsoletas, como falhas no transporte, na instalação, manuseio inadequado, entre outros. Assim, quanto maior o número de placas produzidas, maior o número de resíduos sólidos dispostos destes equipamentos, sendo certo que, devida a toxicidade dos materiais que a compõe, deve se dar uma destinação final adequada a todos os materiais.

Por esta razão, a adoção de políticas como a logística reversa, prevista no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, têm o condão de incentivar – e obrigar – todos os integrantes da cadeia relacionada aos painéis solares fotovoltaicos, inclusive os consumidores, a trabalharem para que os materiais possam ser reaproveitados ou reciclados, reduzindo a necessidade de exploração de novos recursos bem como a energia utilizada para fabricar novos módulos a partir de matéria prima bruta.

O Decreto nº 10.240/2020, então, vem para tentar suprir uma carência na legislação pátria que é o endereçamento de políticas que busquem introduzir a logística reversa para painéis solares fotovoltaicos. Apesar de ser uma política que de fato endereça a questão de logística reversa relacionada a painéis solares, este Decreto apenas trata dos resíduos elétricos e eletrônicos domésticos, de modo que apenas os módulos voltaicos de geração distribuída são abrangidos por ele. Nesse sentido, importante ressaltar que após a vida útil de 30 anos das placas, elas permanecem funcionando com pelo menos 80% de suas cargas originais.

Tendo em vistas que a geração distribuída é majoritariamente utilizada para a geração de energia *in loco* para utilização própria, certo é que a redução de 20% da carga inicial não parece ser motivo suficiente para que todos troquem de imediato as suas placas após decorrido o prazo inicial de sua vida útil. Assim, certo é que essa redução da carga afetará muito mais as companhias que se utilizam da energia solar como uma fonte de renda e que, conseqüentemente, dispõem de um número muito maior de placas solares fotovoltaicas para o exercício de suas atividades, bem como necessitam que todas produzam o máximo de energia possível. Dito isso, é imperioso que o Brasil adote a logística reversa como um instrumento econômico obrigatório a todos os módulos fotovoltaicos, independente de suas origens.

Conforme proposto pelo senador Carlos Viana, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) pode ser adaptada para incluir diretrizes específicas relacionadas à logística reversa de painéis solares e componentes relacionados em geral. Isso envolveria a definição de regras detalhadas para a coleta, transporte, armazenamento, tratamento e destinação adequada dos painéis solares no final de sua vida útil, além de incentivar novos negócios a buscarem se profissionalizar e aumentar a tecnologia embarcada no processo de desmancha dos módulos, aumentando a eficiência e reduzindo os custos da atividade.

Essa abordagem regulatória ajudaria a garantir que os painéis solares fotovoltaicos sejam gerenciados de maneira sustentável, promovendo a reciclagem e a redução dos impactos ambientais associados à sua disposição inadequada. Além disso, incentivaria a economia circular ao aproveitar os materiais e componentes dos painéis solares em novos ciclos de produção, contribuindo assim para a sustentabilidade do setor de energia solar.

Uma vez resolvida a questão regulatória por meio de um mecanismo bem definido, essencial para permitir que o Brasil gerencie sua questão de resíduos fotovoltaicos, o país terá que preparar sua infraestrutura para lidar adequadamente com o descarte dos módulos e, fundamentalmente, desenvolver indústrias que estejam tecnologicamente preparadas para processar com eficiência todas as fases de fim de vida relacionadas ao seu processamento até sua destinação final.

Essa é, sem dúvida, uma tarefa muito difícil, uma vez que as indústrias que reciclam elementos nobres e raros do lixo eletrônico são praticamente inexistentes no Brasil. As empresas que realizam esse tipo de trabalho recuperam apenas elementos de menor valor agregado, como metais menos nobres, plásticos, vidros etc. Outro ponto que vale a pena mencionar é a questão das patentes de tecnologia de reciclagem de módulos fotovoltaicos, caso o Brasil não desenvolva suas próprias tecnologias, e o Brasil terá que lidar com isso no futuro.

Considerando os muitos desafios associados ao gerenciamento adequado dos resíduos solares fotovoltaicos em fim de vida útil, é certo que a reciclagem de painéis desta natureza pode proporcionar sustentabilidade ambiental e econômica ao criar novas oportunidades de negócios. Isso é corroborado pelo fato de que os custos financeiros, ambientais e de energia necessários para processar o silício reciclado são muito menores do que os custos de extração da matéria-prima (D'Adamo et al., 2017). Os módulos

fotovoltaicos atuais e futuros podem ser reciclados, e isso constitui uma oportunidade para pesquisadores e empresas que podem buscar produzir novos produtos.

A falta de manifestação de preocupação e a ausência de medidas concretas por parte do Brasil para lidar com os resíduos gerados quando os sistemas atuais atingirem o fim de sua vida útil podem ser explicadas em parte pelo fato de o país ter iniciado apenas recentemente a implementação em grande escala da energia fotovoltaica. Apesar disso, devemos aproveitar a janela que existe agora para desenvolver políticas e tecnologias capazes de suportar o grande número de módulos fotovoltaicos que irá aumentar cada vez mais nos próximos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Infográfico ABSOLAR. São Paulo, 10/08/2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/posts/absolar---associa%C3%A7%C3%A3o-brasileira-de-energia-solar-fotovoltaica_infogr%C3%A1fico-absolar-junho-activity-7074863561956597760-k9SU?utm_source=share&utm_medium=member_desktop> Acesso em 16.10.2023

BARTIE, N. J., Cobos-Becerra, Y. L., Frohling, M., Schlatmann, R., & Reuter, M. A. (2021). The resources, energetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, Article 105516. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105516>> Acesso em: 10.09.2023

BRASIL. Lei Federal 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2010.

CHOI J-K, Fthenakis V (2010) Design and optimization of photovoltaics recycling infrastructure. *Environmental Science & Technology* 44: 8678–8683. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es101710g?casa_token=7HEzcgI-ECMAAAAA%3Amf37VwJkkN7PNDJlfhUKnWYOBW8gIDPPRp96Zuh82NI8RYgz92d4CH1AzqeTtGIUavE7autb0H2t9s9e> Acesso em: 17.09.2023

CHOI J-K, Fthenakis V (2014) Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: Macro and micro perspectives. *Journal of Cleaner Production* 66: 443–449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613007865?casa_token=kNVnj7ia7ZAAAAA:CnAOXtupaQuT7cQ_lf2Xh9eSIDrVbSVQnnoXsHQ0oK1LsJAkC2XDyfiEMj_baV5n7Cg_Albd5Lk> Acesso em: 17.09.2023

CHOWDHURY, S., Rahman, K., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman Tiong, S., Sopian, K., & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, Article 100431. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>> Acesso em: 10.09.2023

D'ADAMO, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (2017). Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules. *Hindawi: International Journal of Photoenergy*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/4184676>> Acesso em: 10.10.2023

DIAS, Pablo. R. Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos. Porto Alegre, 31 de agosto de 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127924>> Acesso em: 17.08.2023

BRANDI, Paulo. Energia elétrica no Brasil: breve cronologia do setor elétrico brasileiro. ELETROBRAS. 2022. Disponível em: <<https://memoriadaeletricidade.com.br/artigos/119106/energia-eletrica-no-brasil-breve-cronologia-do-setor-eletrico-brasileiro> > Acesso em: 17.08.2023

EMILIO, Patrícia Raysel. Política nacional de resíduos sólidos: o poder transformador e integrador da gestão jurídica dos resíduos sólidos. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Direito) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em:

<https://tede2.pucsp.br/handle/handle/6427?_ga=2.84033242.211316064.1686340885-1474575623.1685643916&_gl=1*_1fmfq7f*_ga*MTQ3NDU3NTYyMy4xNjg1NjQzOTE2*_ga_7TLT3WSQHR*MTY4NjM0MDg4NC4xLjEuMTY4NjM0MTE4OS42MC4wLjA> Acesso em: 17.08.2023

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>> Acesso em 09.06.2023.

EPE, Empresa de pesquisa energética. Anuário estatístico de Energia Elétrica. 2023. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#Apresenta%C3%A7%C3%A3o> > Acesso em 09.06.2023.

EPE, Empresa de pesquisa energética. Balanço energético nacional. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>> Acesso em 09.06.2023.

FARREL, C. C., Osman, A. I., Doherty, R., Saad, M., Zhang, X., Murphy, A., Harrison, J., Vennard, A. S. M., Kumaravel, V., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2020). Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>> Acesso em: 10.09.2023

FIANDRA, Valeria, Lucio Sannino, Concetta Andreozzi, Giorgio Graditi, End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process, *Waste Management*, Volume 84, 2019, Pages 91-101, ISSN 0956-053X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.035>> Acesso em: 10.10.2023

GUARNIERI, Patricia. Logística Reversa: Em busca do equilíbrio econômico e Ambiental – 1 ed. – Recife: Ed. Clube de Autores, 2011. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=I-worBqsMTcC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>> Acesso em: 17.08.2023

Historical GHG Emissions. Climate Watch, 2019. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&end_year=2019§ors=total-including-lucf%2Cenergy&start_year=1990> Acesso em: 10.10.2023

ISLAM MT, Nizami MSH, Mahmoudi S, Huda N. Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: A case study of New South Wales councils in Australia. *Waste Management & Research*. 2021;39(2):386-395. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X20962837?journalCode=wmr>> Acesso em: 17.09.2023

ISLAM, M.T., Huda, N., 2018. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: a comprehensive literature review. *Resour. Conserv. Recycl.* 137, 48e75. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918302015>> Acesso em: 17.09.2023

JACOBI, Pedro Roberto. **Educação ambiental:** o desafio da construção de um pensamento crítico, complexo e reflexivo. *Educação e Pesquisa*. Ag./2005, v.31, n.2, p. 233-250. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ep/a/ZV6sVmKTydvnKVNrqshspWH/?format=pdf&lang=pt>> Acesso em 09.06.2023.

LEITE, Paulo Roberto. 1.ed. Logística reversa / Paulo Roberto Leite. - 1.ed. - São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

LEMOS, Patrícia Faga Iglesias. Direito ambiental: responsabilidade civil e proteção do meio ambiente. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2008

MILARÉ, Édís. Direito do ambiente. 7ª edição. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

NELSON, Monteiro De Sousa, Clóvis Bosco Oliveira, Darliane Cunha, Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles, *Social Sciences & Humanities Open*, Volume 7, Issue 1, 2023, 100456, ISSN 2590-2911. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456>. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259029112300061X>> Acesso em: 10.09.2023

OTENG, Daniel. Towards a sustainable PV waste policy: Exploring the management practices of end-of-life solar photovoltaic modules in Australia. 2023. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/137350>> Acesso em: 17.08.2023

PEREIRA, Ênio Bueno; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüter; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza - Atlas brasileiro de energia solar / 2.ed. - São José dos Campos : INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK). Disponível em: < https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_compressed.pdf> Acesso em: 15.08.2023

São Paulo (Estado) Secretaria do Meio Ambiente. Logística Reversa. Texto Flávio de Miranda Ribeiro. São Paulo; SMA, 2014. 100p. (Série Cadernos de Educação Ambiental, 20) . Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/cea/2014/11/caderno-20-logistica-reversa.pdf>> Acesso em: 17.09.2023

Solar Photovoltaic Cell Basics. Solar Energy Technologies Office. U.S. Department of Energy. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics#:~:text=Silicon%20is%2C%20by%20far%2C%20the,semiconductor%20used%20in%20computer%20chips>> Acesso em: 10.08.2023

Statistics Time Series. IRENA, International Renewable Energy Agency. 2021. Disponível em: <<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>> Acesso em: 17.09.2023

TIEPOLO, G. M., URBANETZ, J., PEREIRA, E. B., PEREIRA, S. V., ALVES, A. R. Energia solar no Estado do Paraná - Potencial, barreiras e políticas públicas. X CBPE, Gramado, 2016. Disponível em:

TIISEL, Fernanda Leopoldina Dutra Brandani. Política nacional de resíduos sólidos: a efetividade do sistema de logística reversa na gestão de equipamentos de TI e comunicação. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Direito) - Programa de Estudos Pós-Graduados em Direito, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://tede2.pucsp.br/handle/handle/22265>> Acesso em: 15.08.2023