



GESTÃO DOS RESÍDUOS E RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.I-029>

Wemerson Franklyn Araujo de Oliveira (*), Cristiano Cruz da Silva, Doralice de Souza Luro Balan

* Centro “Paula Souza” - Faculdade de Tecnologia de Campinas, SP. E-mail: wemerson.oliveira@fatec.sp.gov.br

RESUMO

O ponto de partida deste trabalho foi apresentar uma realidade factível projetada para um futuro breve, envolvendo a relação entre o acelerado crescimento da utilização de módulos fotovoltaicos para a geração de eletricidade e a produção de seus resíduos ao fim de sua vida útil. Esta pesquisa teve por objetivos: considerar a problemática atual da geração de resíduos advindos de módulos fotovoltaicos descomissionados e abordar ações que viabilizem uma logística reversa adequada, eficiente e atuante. Para consolidar as informações apresentadas a metodologia incluiu pesquisa bibliográfica, dados fornecidos por setores governamentais e não-governamentais com *expertise* no tema, e contatos pessoais com integrantes de todos os níveis do ciclo operacional. Diante da tendência de crescimento prevista para o setor fotovoltaico nacional, que se favorece com a extensão territorial do país e seus bons níveis de irradiação solar durante o ano, observa-se na gestão de resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos uma excelente oportunidade de aplicação da economia circular. É relevante considerar o fato de os módulos fotovoltaicos depreciados, serem caracterizados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos REEEs. A legislação brasileira está voltada para seu uso em domicílios e não no setor industrial e, uma reflexão maior sobre tal questão é urgente. Observou-se a relevância do assunto proposto, visto que um bom plano de logística reversa aplicada a esta tecnologia, atividade ainda inexistente no Brasil, permitirá sustentabilidade e um lucrativo modelo de negócio. Essa poderá ser uma valiosa contribuição com o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da sociedade. Esta estrutura de gerenciamento de resíduos promove atraentes taxas de lucratividade, redução de energia no processo de extração dos recursos naturais conciliando o equilíbrio, entre o desenvolvimento tecnológico e a preservação do meio ambiente. A gestão da vida útil desses módulos fotovoltaicos poderá gerar receitas, criar diversas oportunidades de negócios, aumentar a oferta de empregos, da renda e principalmente ajudar no equilíbrio ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos, Módulos fotovoltaicos, Energia Solar

ABSTRACT

The starting point of this work was to present a feasible reality projected for a short future, involving the relationship between the accelerated growth of the use of photovoltaic modules for the generation of electricity and the production of its residues at the end of its useful life. The objectives of this research were: to consider the current problem of waste generation from decommissioned photovoltaic modules and to address actions that enable adequate, efficient and active reverse logistics. To consolidate the information presented, the methodology included bibliographical research, data provided by governmental and non-governmental sectors with expertise in the subject, and personal contacts with members of all levels of the operational cycle. In view of the expected growth trend for the national photovoltaic sector, which is favored by the country's territorial extension and its good levels of solar irradiation during the year, an excellent opportunity to apply circular economy. It is relevant to consider the fact that depreciated photovoltaic modules are characterized as waste electrical and electronic equipment WEEEs. The Brazilian legislation is focused on its use in households and not in the industrial sector, and further reflection on this issue is urgent. The relevance of the proposed subject was observed, since a good reverse logistics plan applied to this technology, which still does not exist in Brazil, will allow for sustainability and a profitable business model. This could be a valuable contribution to society's socioeconomic and environmental development. This waste management structure promotes attractive profitability rates, energy reduction in the process of extracting natural resources, reconciling the balance between technological development and environmental preservation. The management of the useful life of these photovoltaic modules can generate revenue, create several business opportunities, increase the supply of jobs, income and, above all, help in the environmental balance.

KEY WORDS: Solid Waste, Photovoltaic Modules, Solar Energy



INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos que convertem os raios solares em eletricidade. Sua implantação iniciou-se no Brasil por volta de 2011; devido aos altos níveis de irradiação solar em todo o território nacional, aliado a condições atraentes para sua aquisição oferecidas por instituições financeiras, atingiu expansão a altos índices em poucos anos, prometendo expandir-se ainda mais nas próximas décadas (SILVA *et al.*, 2019).

Existem diversas tecnologias empregadas no setor energético fotovoltaico possibilitando diferentes configurações, tipos e modelos. Os painéis fotovoltaicos são basicamente classificados em três gerações: I (silício cristalino células), II (células de película fina) e III (células corantes). Na grande maioria dos sistemas fotovoltaicos instalados os módulos, até o momento, têm sido de silício cristalino. Os métodos de reciclagem desenvolvidos e testados até agora são dedicados principalmente aos módulos de primeira geração, especialmente para aplicações industriais (CZAJKOWSKI, *et al.*, 2023).

A geração de energia via painéis solares cresceu 68,7% no Brasil durante o ano de 2020. O Plano Decenal de Expansão da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê que, até 2030, a potência instalada da tecnologia salte de 5,6 gigawatts (GW) para 17 GW na geração distribuída (sistemas que produzem até 5 MW de energia) e de 3,3 GW para 8 GW na geração centralizada (grandes usinas). A energia sustentável, contudo, possui um desafio: a falta de uma logística reversa – ou seja, a destinação correta dos painéis descartados, feitos de insumos como silício, alumínio, vidro e metais nobres como cobre, prata e, em alguns casos, finas camadas de ouro (ABSOLAR, 2022).

O ano de 2022 foi bastante representativo em termos normativos para o setor de gestão de resíduos sólidos no Brasil. Houve a edição do Decreto nº 10.936/2022, que trouxe nova regulamentação para a Lei 12.305/2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos; o Decreto nº 11.043/2022, que instituiu o Planares - Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o principal instrumento previsto na Lei, que estabelece as estratégias, diretrizes e metas para o setor, num horizonte de 20 anos (BRASIL, 2010; ABRELPE, 2022).

É relevante considerar o fato de os módulos fotovoltaicos depreciados, serem caracterizados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos REEEs. A legislação brasileira está voltada para seu uso em domicílios e não no setor industrial e uma reflexão maior sobre tal questão é urgente.

OBJETIVOS

O ponto de partida deste trabalho é apresentar uma realidade factível projetada para um futuro breve, envolvendo a relação entre o acelerado crescimento da utilização de módulos fotovoltaicos para a geração de eletricidade e, a produção de resíduos ao fim de sua vida útil.

Esta pesquisa teve por objetivos: considerar a problemática atual da geração de resíduos advindos de módulos fotovoltaicos descomissionados e abordar ações que viabilizem uma logística reversa adequada, eficiente e atuante.

METODOLOGIA

Para consolidar as informações apresentadas a metodologia incluiu pesquisa bibliográfica, dados fornecidos por setores governamentais e intergovernamentais com *expertise* no tema, e contatos pessoais com integrantes de todos os níveis do ciclo operacional, envolvendo a comercialização e utilização de módulos fotovoltaicos (GIL, 2008).

RESULTADOS

Os painéis fotovoltaicos estão projetados para gerar energia renovável durante 25 a 30 anos, embora esta possa chegar até aos 40 anos. Durante essa vida poderão perder 06 a 20% da sua capacidade de produção de energia. Desse modo, urge começar a desenvolver ações para resolver este problema, identificando o seu destino, tratamento e aproveitamento do material recuperado (MAHMOUDI, 2019).

A indústria recicladora deste tipo de painéis permite a recuperação de materiais como, por exemplo, vidro, alumínio e cobre para os painéis C-Si, que constituem até mais de 85% do peso do total dos painéis. Há referência a que 90-97% do peso dos módulos pode ser reciclado e se aplicável, no máximo 5% podem ir a aterros sanitários sendo que o vidro ou a película plástica (polímeros de etileno acetato de vinila – eva), são indicados inclusive para o revestimento dos aterros (LEMPKOWICZ, 2019).



Em nossos resultados, ao reunir os elementos das análises quantitativas citadas pelas publicações e referências para a construção deste trabalho, assim como consultas pessoais a profissionais envolvidos na temática, foi possível a elaboração de tabelas com o propósito de sistematizar informações, apresentando-as de forma clara e precisa para facilitar a leitura e a compreensão dos dados.

Tabela 1 - Resultados modelados de volumes de resíduos cumulativos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida no país em toneladas (ton.) referentes aos anos (2016 -2030).

Fonte: < irena ieapvps end-of-life solar pv panels 2016.pdf > acesso em 15.set.2022

Ano	2016		2020		2030	
Cenário	Perda regular	Perda precoce	Perda regular	Perda precoce	Perda regular	Perda precoce
Brasil	10	10	40	100	2500	8500

A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram dados sobre o Brasil publicados pela *Internacional Renewable Energy Agency* (IRENA) em relação a descarte dos módulos fotovoltaicos, incluindo dados reais e estimativas estatísticas ao longo das próximas décadas.

Tabela 2- Resultados modelados de volumes de resíduos cumulativos estimados de painéis fotovoltaicos em fim de vida no país em toneladas referente aos anos (2040 a 2050).

Fonte: < irena ieapvps end-of-life solar pv panels 2016.pdf > acesso em 15.set.2022

Ano	2040		2050	
Cenário	Perda regular	Perda precoce	Perda regular	Perda precoce
Brasil	18.000	160.000	300.000	700.000

A somatória dos valores cumulativos de resíduos estimados até 2050 atingirá o montante de 1.189.160 ton. (um milhão cento e oitenta e nove mil cento e sessenta toneladas). Logo, projetos bem gerenciados possibilitarão uma forma rentável de empreendedorismo conciliando o desenvolvimento tecnológico com reduções de impactos no meio ambiente.

Tabela 3 - Percentual dos resíduos por unidade de módulo específico analisado.

Fonte: Elaboração própria dos autores, 2022.

Em um módulo de 23kg, com 72 células	% em cada módulo	Peso de cada componente por módulo em Kg	Preço de mercado pago por Kg	Valor por módulo de acordo com % material
Alumínio	10,30	2,369	R\$ 6,90	R\$ 16,346
Vidro	74,16	17,057	R\$ 0,14	R\$ 2,388
Polímero	11,31	2,601	R\$ 0,70	R\$ 1,821
Silício	3,35	0,770	R\$ 10,60	R\$ 8,167
Cobre	0,57	0,131	R\$ 22,00	R\$ 2,884
Prata	0,01	0,002	R\$ 52,00	R\$ 0,120
Estanho	0,12	0,028	R\$ 33,49	R\$ 0,924
Zinco	0,12	0,028	R\$ 5,38	R\$ 0,148
Chumbo	0,06	0,014	R\$ 6,00	R\$ 0,083
TOTAL	100%	23Kg	-	R\$ 32,881

A Tabela 3 e Tabela 4 apresentam valores financeiros potenciais, obtidos a partir de contatos pessoais com recicladores da região de Campinas, SP em 2022.

O valor financeiro recuperado com a reciclagem dos elementos contidos em módulos fotovoltaicos depreciados (Tabela 4) atingirá nos períodos analisados o montante de R\$ 4.878.833.600,00 (quatro bilhões, oitocentos e setenta e oito milhões, oitocentos e trinta e três mil e seiscentos Reais). Os valores apresentados são baseados nas estimativas de projeção de resíduos fotovoltaicos catalogado na publicação da IRENA e IEA-PVPS (2016).



Tabela 4 - Quantificação de massa e arrecadação financeira

Fonte: Elaboração própria dos autores, 2022.

Tipo de Material	Total em Kg/2050	Valor do Kg/(R\$)	Total obtido/(R\$)
Alumínio	93.891.200	8,00	751.129.600,00
Chumbo	1.182.000	11,00	13.006.400,00
Cobre	11.824.400	35,00	413.840.000,00
Estanho	1.182.400	21,00	24.830.400,00
Prata	1.182.400	3.090,00	3.653.616.000,00
Polímeros	28.014.000	0,80	22.411.200,00

Há no presente, oportunidades e desafios no que se refere à reciclagem dos equipamentos fotovoltaicos; os métodos de reciclagem necessitam ainda de ser melhorados e uma logística eficaz de recolhimento, armazenagem e distribuição precisam ser efetivados.

Não há no país uma empresa em atividade que faça a reciclagem especializada dos módulos fotovoltaicos descartados. As empresas existentes reciclam resíduos eletroeletrônicos gerais.

A União Europeia (UE) atualmente vem aplicando um excelente modelo de ações e regulamentações particularmente direcionado para os resíduos fotovoltaicos, determinando metas para testes de materiais perigosos, tratamento, descarte e reciclagem desses produtos. A diretiva base é o princípio de responsabilidade estendida ao produtor, exigindo que os fornecedores de módulos fotovoltaicos financiem os processos de coleta e reciclagem dos módulos independentemente de qual localidade estes estejam localizados. Está em operacionalização a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e eletrônicos da União Europeia (Czajkowski, 2023).

Existe uma oportunidade de negócio relacionado com a reciclagem que poderá ser interessante para alguns investidores, nomeadamente os que estão trabalhando em áreas de reciclagem afins.

A gestão da vida útil desses módulos fotovoltaicos pode gerar receitas, criar diversas oportunidades de negócios, aumentar a oferta de empregos, da renda e principalmente ajudar no equilíbrio ambiental.

CONCLUSÕES

Foi possível verificar que o cenário fotovoltaico brasileiro permite um amplo crescimento e, conseqüentemente vai gerar resíduos com alto valor de mercado.

Pode-se recomendar a estruturação de projetos eficazes que visem promover a gestão de resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos, principalmente para as usinas fotovoltaicas onde foi perceptível uma fragilidade nas regulamentações.

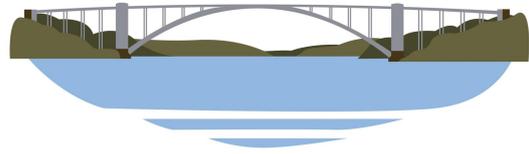
Uma boa gestão empenhada em atingir metas e proteção do meio ambiente, proporcionará receitas significativas para o Brasil em curto prazo.

Será importante implementar ações conjuntas do setor privado e público com instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, procurando desenvolver projetos e soluções de aproveitamento de módulos descomissionados, como um caminho de conhecimento aplicado e seguro.

A colaboração plena de todas as partes envolvidas na temática, será extremamente significativa para a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil** 2022. 64 p.
2. ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico**. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> acesso em 19 set. 2022.



3. BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 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 http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 01 de jun. de 2021.
4. CZAJKOWSKI, A.; WAJDA, A.; PORANEK, N.; BHADORIA, S.; REMIORZ, L. *Prediction of the Market of End-of-Life Photovoltaic Panels in the Context of Common EU Management System.* **Energies** 2023, 16, 284.
5. GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008, 200p.
6. IRENA & IEA-PVPS, *International Renewable Energy Agency.* **End-of-life Management: Solar Photovoltaic Panels.** 2016, p100. Disponível em :< irena_ieapvps_end-of-life_solar_pv_panels_2016.pdf>, acesso em 15.set.2022.
7. LEMPKOWICZ B., *With 151.000 tons of end-of-life PV panels expected before 2030, recycling is not an option. Webinar – PV end-of-life management- reduce, reuse, recycle.* **ATA Insights**, 7th March 2019.
8. MAHMOUDI S., et al., End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review, *Resources, Conservation and Recycling.* Vol. 146, julho 2019, p. 1-16.
9. SILVA, F.S. et al (organizadores). **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro.** Aracaju- Sergipe. Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual, 2019. 316 p.