



Avaliação da periculosidade de resíduos de módulos fotovoltaicos por meio da norma brasileira NBR 10004

Pedro Amado Petroli ¹, Priscila Silva Silveira Camargo ², Israel Silva dos Anjos ³, Hugo Marcelo Veit ⁴

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais/
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (pedro.petroli@ufrgs.br)

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais/
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (priscila.silveira@ufrgs.br)

³ Engenharia Mecânica/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (israel.anjos@ufrgs.br)

⁴ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais/
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (hugo.veit@ufrgs.br)

Resumo

A capacidade instalada de energia solar fotovoltaica está em ascensão no Brasil, podendo atingir 64 GW em 2026, o que acarretará em quantidades significativas de painéis solares em fim de vida útil nos próximos anos. Porém, os painéis solares são conhecidos por apresentarem metais tóxicos como chumbo e cádmio em sua composição. Então, como forma de auxiliar na gestão ambiental desses resíduos, este estudo consiste em analisar quatro tecnologias de módulos fotovoltaicos com o intuito de classificá-los como resíduos perigosos ou não perigosos ao meio ambiente do ponto de vista da toxicidade ambiental. Deste modo, realizou-se o ensaio de lixiviação segundo a norma NBR 10005 e posterior classificação segundo a norma NBR 10004 para os painéis solares de Silício amorfo (a-Si), Telureto de cádmio (CdTe), Silício policristalino (pSi), Seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). Os resultados indicaram que a concentração de chumbo foi excedida em 3,95 vezes o limite de tolerância da norma para o painel pSi e, a concentração de cádmio no lixiviado do painel CdTe foi de 0,55 mg/L, excedendo também o limite de tolerância. Por isso, os resíduos provenientes de painéis pSi e CdTe devem ser classificados como resíduos perigosos pela norma NBR 10004. Além disso, os painéis a-Si e CIGS apresentaram concentrações de metais tóxicos no lixiviado, apesar de não terem excedido os limites da norma.

Palavras-chave: Resíduos de Painéis Fotovoltaicos. Toxicidade Ambiental. NBR 10004.

Área Temática: Resíduos Sólidos.

Hazard assessment of photovoltaic module waste using the Brazilian standard NBR 10004

Abstract

The installed capacity of photovoltaic solar energy is on the rise in Brazil, and could reach 64 GW by 2026, which will lead to significant quantities of end-of-life solar panels in the coming years. However, solar panels are known to have toxic metals such as lead and cadmium in their composition. So, as a way to help in the environmental management of this waste, this study consists in analyzing four technologies of photovoltaic modules in order to classify them as hazardous or non-hazardous waste to the environment from the point of view of environmental toxicity. Thus, the leaching test according to NBR 10005 standard and



7º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 9 a 11 de maio de 2023

subsequent classification according to NBR 10004 standard was performed for solar panels made of amorphous silicon (a-Si), cadmium telluride (CdTe), polycrystalline silicon (pSi) and copper indium gallium selenide (CIGS). The results indicated that the lead concentration was exceeded by 3.95 times the tolerance limit of the standard for the pSi panel and, the cadmium concentration in the leachate from the CdTe panel was 0.55 mg/L, also exceeding the tolerance limit. Therefore, the waste from pSi and CdTe panels were classified as hazardous waste by the NBR 10004 standard. Furthermore, the a-Si and CIGS panels presented concentrations of toxic metals in the leachate, although they did not exceed the limits of the standard.

Key words: Photovoltaic Module Waste. Environmental Toxicity. NBR 10004.

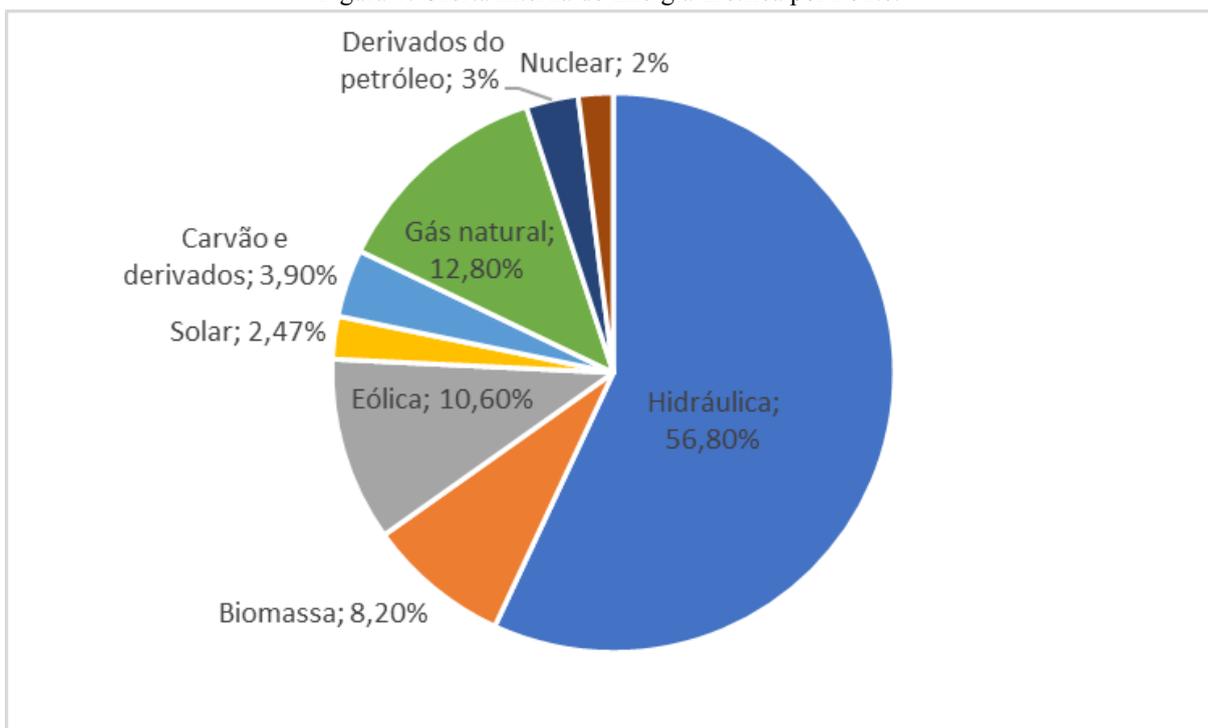
Theme Area: Solid Waste.



1 Introdução

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2022), a matriz energética brasileira é composta, predominantemente, por alternativas renováveis, que correspondem a um total de aproximadamente 78% da oferta interna de eletricidade, com destaque para a fonte hídrica, que responde por 56,8% (incluindo importação e autoprodução). A energia solar, no ano de 2022, correspondeu a 2,47%, figura 1.

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



Fonte: Adaptado de BEN (2022).

De acordo com projeções da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o mercado brasileiro da energia solar seguirá crescendo, especialmente por conta da lei de geração distribuída (Lei nº 14.300/2022) que trouxe mais segurança jurídica, estabilidade, previsibilidade e transparência ao mercado. A micro e minigeração distribuída no Brasil (MMGD) com base em geração solar fotovoltaica atingiu 8.771 MW de potência instalada e 9.019 GWh de geração em 2021, representando 88,3% da MMGD (BEN, 2022). Além disso, espera-se que o Brasil atinja 54 GW de capacidade instalada em 2026 (EUROPE, 2022). Esse crescimento na participação da energia solar na matriz energética brasileira vem acompanhada da produção e uso dos painéis fotovoltaicos, os quais têm uma vida útil média de 25 anos, e após tornam-se resíduos (CHOWDHURY, 2020).

De acordo com Oliveira (2021), o Brasil ocupa posição de destaque na produção de resíduos eletroeletrônicos, sendo o maior produtor da América Latina e o sétimo maior produtor do mundo. Entretanto, no que diz respeito a resíduos fotovoltaicos, existe uma carência de informações e dados quantitativos a respeito de resíduos fotovoltaicos gerados no país, bem como Miranda et al. (2019) reforça que, não há nenhuma lei ou norma no país que seja destinada, especificamente, ao manejo de resíduos de módulos fotovoltaicos. Ou seja, que determinem diretrizes e procedimentos específicos para estes materiais e, conseqüentemente, para o seu destino final ambientalmente adequado. Desta forma, assim como qualquer tipo de



resíduo, seguem apenas pautados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e podem ser avaliados e classificados, sob o regime da NBR 10.004 (2004). Além disso, também podem vir a ser enquadrados pela NBR 16156/13, que determina requisitos para a atividade de manufatura reversa de Resíduos Eletroeletrônicos (REEs).

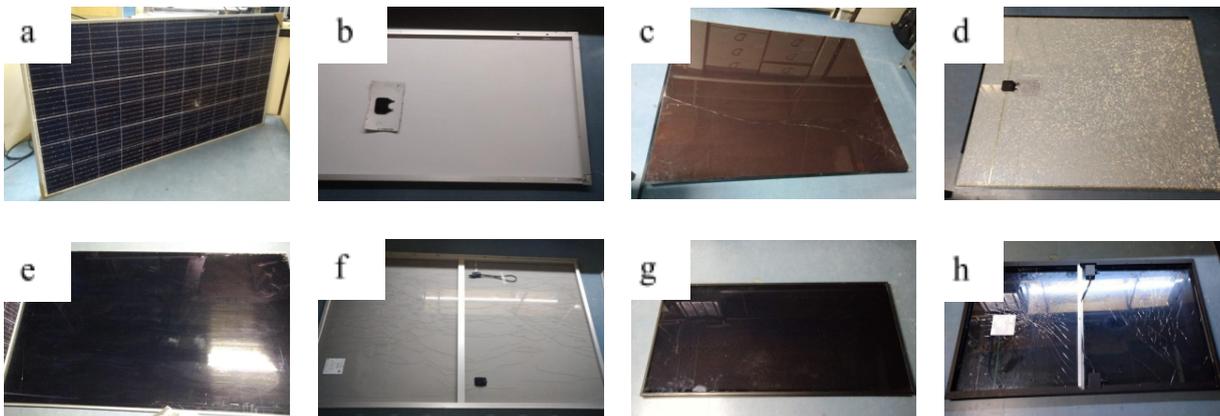
Entretanto, apesar da ausência de norma específica para os resíduos fotovoltaicos, já existem empresas no território brasileiro que atuam na recuperação de materiais como plástico, vidros e metais dos módulos (OLIVEIRA, 2021). Steiner (2020) relata que a primeira empresa deste ramo na América Latina, foi instituída no Brasil, nomeada como SunR. Localizada em Vinhedo/SP, essa empresa consegue executar, em média, o aproveitamento (reciclagem) de 90% dos painéis fotovoltaicos (ou seja, dos materiais que compõem os módulos), recebidos por meio da coleta e logística reversa (SUNR, 2023).

No entanto, o descarte inadequado de resíduos de módulos fotovoltaicos pode proporcionar impactos negativos ao meio ambiente e, conseqüentemente, à saúde humana (TONHOLI, 2021). A periculosidade associada a painéis solares deve-se aos metais tóxicos presentes em sua composição como, por exemplo, cádmio, chumbo, prata e selênio (NAIN; KUMAR, 2021). Dessa forma, a possível liberação desses elementos, devido ao descarte incorreto no meio ambiente, é preocupante. Por isso, este trabalho teve como objetivo analisar quatro tecnologias de painéis solares comumente utilizadas (silício policristalino, silício amorfo, telureto de cádmio e disseleneto de cobre, índio e gálio) e classificar a periculosidade desses resíduos em termos de toxicidade ambiental.

2 Metodologia

Neste trabalho, quatro tecnologias diferentes de módulos fotovoltaicos foram usadas para comparar os elementos perigosos liberados após um teste de lixiviação padrão. As quatro tecnologias analisadas (Figura 2) foram: silício policristalino da marca Risen Solar Technology (da China), modelo RSM72-6-320P-340P/5BB; silício amorfo da marca Sungen International Limited (de Hong Kong), modelo SG-HN100-GG; filme fino de telureto de cádmio da marca First Solar (do Arizona, EUA), modelo FS-6425A e filme fino de disseleneto de cobre, índio e gálio da marca Avancis CNBM (da Alemanha), modelo PowerMax-STRONG-120.

Figura 2. Módulos fotovoltaicos selecionados (a) Módulo de silício policristalino - vista frontal (b) Módulo de silício policristalino - vista traseira (c) Módulo de silício amorfo - vista frontal (d) Módulo de silício amorfo - vista traseira (e) Módulo de película fina de telureto de cádmio - vista frontal (f) Módulo de filme fino de telureto de cádmio - vista posterior (g) Filme fino de cobre gálio e disseleneto indiano (CIS/CIGS) - vista frontal (h) Filme fino de cobre gálio e disseleneto indiano (CIS/CIGS) - vista posterior.

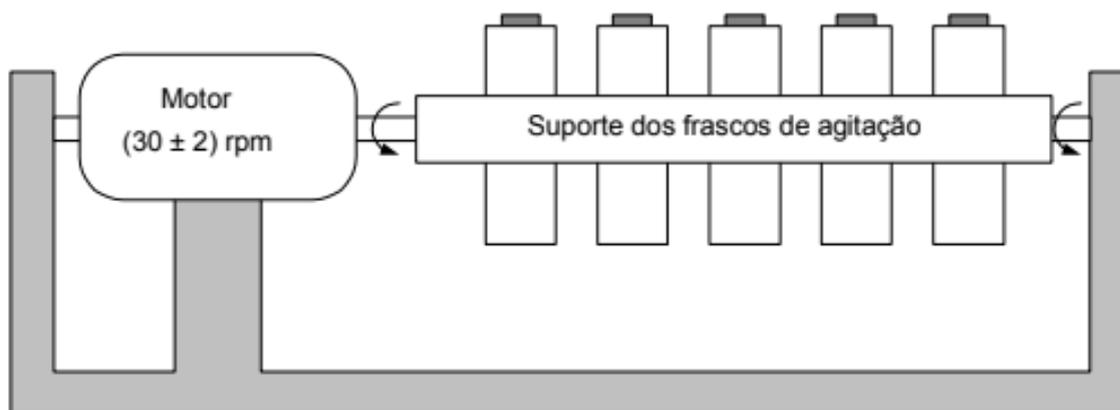




Fonte: Elaboração Própria.

A norma NBR 10005 (2004) da associação brasileira de normas técnicas (ABNT) fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 (2004) como classe I – perigosos e classe II – não perigosos. A respeito do procedimento da NBR 10005 (2004), realizou-se a determinação preliminar da amostra sólida dos painéis solares de modo a remover a moldura de alumínio (se aplicável) e recortar com tesoura metálica cada painel solar e, após, triturar a amostra em moinho de martelos para obtenção de granulometria inferior a 9,5 mm para que a amostra ficasse pronta para a etapa de extração. Então, 100 g dessa amostra foram adicionados à 2 L de solução de extração utilizada que é composta por uma mistura de ácido acético, água deionizada e hidróxido de sódio, com pH de 4,93. O frasco foi fechado e mantido sob agitação durante 18 h à temperatura de até 25°C com uma rotação de 30 rpm em um agitador rotatório como o exemplificado na figura 3. Cabe destacar que todos estes parâmetros e procedimentos seguiram estritamente o que está descrito na NBR 10005.

Figura 3: Agitador rotatório de frasco.



Fonte: ABNT NBR 10005 (2004).

Após o período de agitação, as amostras foram filtradas com papel filtro Micropore 0,22 µm. Por fim, os extratos foram analisados por Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES).

3 Resultados e discussão

Aplicando-se o procedimento da NBR 10005, os resultados das amostras analisadas por ICP-OES do extrato obtido no ensaio de lixiviação foram comparados com o limite de tolerância estabelecido no anexo F da NBR 10004, conforme tabela 1. Os valores obtidos para concentração de Pb foi de 3,95 mg/L no painel pSi, excedendo o limite máximo de 1 mg/L estipulado pela norma. Dessa forma, como um elemento acima do limite de tolerância já é o suficiente, esse tipo de módulo fotovoltaico deve ser classificado como resíduo classe I. Caso não seja reciclado, esse resíduo deverá ser disposto em aterro de resíduos perigosos. A concentração de Cd no lixiviado do painel CdTe resultou em 0,55 mg/L, sendo também classificado como resíduo perigoso, pois o resíduo do painel CdTe excedeu o limite de tolerância da NBR 10004 que é de 0,5 mg/L.



Neste trabalho, os elementos presentes no lixiviado do painel CIGS e no lixiviado do painel a-Si não tiveram suas respectivas concentrações excedidas pelos limites da norma, segundo a tabela 1. Por isso, esses dois painéis são considerados resíduos classe II - não perigosos e, caso não sejam reciclados, poderão ser descartados em aterros sanitários. Apesar disso, no lixiviado do painel CIGS foi constatada uma concentração de 0,23 mg/L de Pb e no lixiviado do painel a-Si obteve-se concentração de 0,37 mg/L de Pb. Embora estes valores não ultrapassem os limites permitidos, eles comprovam a presença destes elementos tóxicos na composição destes painéis. Dessa forma, sugere-se precauções quanto ao adequado descarte desses módulos fotovoltaicos, porque, conforme Moreira e Moreira (2004), mesmo em baixas concentrações, o chumbo é considerado um metal tóxico e cancerígeno que apresenta riscos à saúde humana.

Tabela 1 – Resultado ensaio lixiviação NBR 10005 e limite de tolerância NBR 10004 anexo F.

Elemento	Lixiviado pSi (mg/L)	Lixiviado CdTe (mg/L)	Lixiviado CIGS (mg/L)	Lixiviado a-Si (mg/L)	Limite de tolerância NBR 10004 (mg/L)
As	0,01	0,03	0,01	0,02	1
Ba	0,05	0,02	0,02	0,04	70
Cd	0,03	0,55	0,14	0,03	0,5
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01	5
Pb	3,95	0,31	0,23	0,37	1
Hg	0	0	0	0	0,1
Se	0,04	0,04	0,25	0,02	1
Ag	0	0	0	0	5

Fonte: Elaboração Própria.

Dias (2015) aplicou o ensaio de lixiviação, conforme NBR 10005, para módulo fotovoltaico de silício policristalino da marca Solbratec. A concentração de Pb obtida no lixiviado foi de 5,5 mg/L, sendo também classificado como resíduo perigoso (DIAS,2015).

4 Conclusões

Empregando-se o procedimento do teste de lixiviação segundo a NBR 10005, os resultados indicaram que o painel solar de silício policristalino e telureto de cádmio foram enquadrados como classe I - resíduos perigosos, pois apresentaram concentrações acima do limite de tolerância para chumbo e cádmio no lixiviado, respectivamente. No entanto, os painéis de silício amorfo e disseleneto de cobre índio e gálio também apresentaram liberação de metais tóxicos prejudiciais ao meio ambiente. Por isso, mesmo que os elementos não tenham excedido o limite de tolerância da norma NBR 10004, indica-se a disposição dos painéis solares em aterro de resíduos perigosos, caso a reciclagem não seja viável. Além disso, a variação da composição de diferentes tecnologias, diferentes modelos e fabricantes de módulos fotovoltaicos podem indicar variabilidade nos resultados do teste de lixiviação, por isso é necessária a continuação de estudos baseados na toxicidade ambiental, para melhor



representatividade dos possíveis riscos à saúde humana e ao meio ambiente decorrentes do uso generalizado de células solares. Portanto, este trabalho demonstrou preocupação associada à toxicidade e ao correto descarte de resíduos de módulos fotovoltaicos. Fica claro que a reciclagem destes equipamentos é a melhor alternativa, visto que o descarte, além de desperdício de matérias primas, pode trazer riscos ambientais.

5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Referências

ABSOLAR. **O crescimento da energia solar no Brasil. E o seu futuro.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/o-crescimento-da-energia-solar-no-brasil-e-o-seu-futuro/>. Acesso em: 21 fev. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação.** ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16156: **Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos:** requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2010.

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

DIAS, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares).** Dissertação (Programa de Pós-Graduação de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

EPE. **Balanco Energético Nacional (BEN):** Ano Base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

EUROPE, Solar Power. Global Market Outlook For Solar Power 2022-2026. **Sol. Power Eur**, 2022.

OLIVEIRA, E. V. **Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração.** 2021. 74f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. S.; SILVA, T. C. **Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos.** 2019. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 8, n.1, p.364-383, 2019.



7º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 9 a 11 de maio de 2023

MOREIRA, Fátima Ramos; MOREIRA, Josino Costa. Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 15, n. 2, p. 119-129, 2004.

STEINER, K. H. **Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2020.

SUNR. **Reciclagem Fotovoltaica**. Disponível em: <https://sunr.com.br/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

NAIN, Preeti; KUMAR, Arun. Understanding metal dissolution from solar photovoltaics in MSW leachate under standard waste characterization conditions for informing end-of-life photovoltaic waste management. **Waste Management**, v. 123, p. 97-110, 2021.