

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CHRISTOPHER KASBURG

RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APÓS SEU TEMPO DE VIDA ÚTIL

CURITIBA

2023

CHRISTOPHER KASBURG

RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APÓS SEU TEMPO DE VIDA ÚTIL

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do curso MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador/Professor: Prof. Dr. Ugo Belini

POUSO REDONDO

2023

Reciclagem de painéis fotovoltaicos após seu tempo de vida útil

Christopher Kasburg

RESUMO

O sol é uma estrela de classe G que emite uma enorme quantidade de energia, principalmente sob a forma de luz e calor. Esta energia pode ser capturada e transformada em eletricidade usando células fotovoltaicas, um processo chamado de efeito fotoelétrico. As células fotovoltaicas são compostas por camadas de materiais semicondutores, que absorvem a luz e geram corrente elétrica. Essas células são convenientemente agrupadas na forma de painéis solares, que podem ser instalados em telhados, paredes, ou em grandes áreas abertas. A energia solar tem sido amplamente utilizada em todo o mundo, graças às suas vantagens, tais como a independência energética, a redução da conta de energia e a garantia de geração de energia elétrica por pelo menos 25 anos. No entanto, é importante considerar o que acontece com esses painéis após o final de sua vida útil. Os painéis solares contêm materiais tóxicos, como o chumbo, o cádmio e o selênio, que podem poluir o solo e a água se não forem descartados corretamente. Além disso, a fabricação dos painéis solares é um processo intensivo em energia e libera uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Estudos sugerem que a energia consumida para produzir um painel solar pode ser equivalente a vários anos de geração de energia elétrica pelo painel. Apesar dos impactos ambientais negativos associados à produção e ao descarte de painéis solares, a energia solar ainda é considerada uma opção mais sustentável em comparação com os combustíveis fósseis. A reciclagem de painéis solares é possível e já é feita em alguns países. O processo envolve a remoção dos materiais perigosos, seguido da separação e recuperação dos materiais valiosos, como o silício, o alumínio e o vidro. Neste trabalho de pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, analisamos os impactos ambientais associados aos sistemas fotovoltaicos de silício cristalino, um dos tipos mais comuns de painéis solares. Concluímos que é importante considerar não apenas os benefícios da energia solar, mas também seus impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos painéis solares. A reciclagem de painéis solares deve ser incentivada e aprimorada para garantir uma melhor preservação do meio ambiente.

Palavras-chave: Energia Solar. Sustentabilidade. Ciclo de vida.

ABSTRACT

The sun is a class G star that emits a tremendous amount of energy, primarily in the form of light and heat. This energy can be captured and transformed into electricity

using photovoltaic cells, a process called the photoelectric effect. Photovoltaic cells are composed of layers of semiconductor materials, which absorb light and generate an electric current. These cells are conveniently grouped together in the form of solar panels, which can be installed on roofs, walls, or in large open areas. Solar energy has been widely used around the world, thanks to its advantages such as energy independence, reduced energy bills, and a guarantee of generating electricity for at least 25 years. However, it is important to consider what happens to these panels after the end of their useful life. Solar panels contain toxic materials such as lead, cadmium, and selenium, which can pollute soil and water if not properly disposed of. In addition, the manufacture of solar panels is an energy-intensive process and releases a large amount of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. Studies suggest that the energy consumed to produce a solar panel can be equivalent to several years of electricity generation by the panel. Despite the negative environmental impacts associated with the production and disposal of solar panels, solar energy is still considered a more sustainable option compared to fossil fuels. Recycling of solar panels is possible and is already being done in some countries. The process involves the removal of hazardous materials, followed by separation and recovery of valuable materials such as silicon, aluminum, and glass. In this qualitative bibliographic research, we analyzed the environmental impacts associated with crystalline silicon photovoltaic systems, one of the most common types of solar panels. We concluded that it is important to consider not only the benefits of solar energy but also its environmental impacts throughout the entire life cycle of solar panels. Recycling of solar panels should be encouraged and improved to ensure better preservation of the environment.

Keywords: Solar energy. Sustainability. Life Cycle.

1 INTRODUÇÃO

Muito se fala em benefícios da energia solar, mais pouco se fala do quão realmente renovável essa tecnologia é. Hoje não se olha para os impactos causados e está longe ainda de se olhar, muitos assuntos não são abordados, como o quanto se gasta de energia para produzir um módulo, qual o impacto ambiental causado desde a produção até o descarte do mesmo (CHOWDHURY, 2020, p. 1). O maior benefício dessa energia, o que está fazendo ela alavancar de maneira surpreendente é seu baixo custo de manutenção que basicamente é exigida a limpeza dos módulos, sua longa vida útil e garantia também longa, de acordo com Majeski (2021, p. 3), tendo 25 anos de garantia, isso seria perfeito se não tivéssemos outras questões envolvidas, tais como: gasto de energia com a produção dos módulos, uso de materiais tóxicos, descarte, a obsolescência da tecnologia, que

vem se desenvolvendo muito rápido e logo a tecnologia comprada hoje não irá mais existir no mercado. Embora os painéis solares possam perder alguma eficiência ao longo do tempo, a maioria das unidades ainda produzirá energia elétrica por muitos anos após essa vida útil nominal. Além disso, muitos componentes, como inversores, armazenamento de bateria e outros equipamentos, geralmente têm garantias de fabricantes de 5 a 10 anos. Segundo Coelho (2018, p. 84) e Padoan (2018, p. 748) a manutenção do sistema é relativamente simples e consiste principalmente em limpeza periódica dos painéis para garantir que a luz do sol possa chegar a eles com eficiência.

Existem algumas maneiras de aumentar a vida útil das placas solares fotovoltaicas, tais como Instalação correta, as placas solares devem ser instaladas de forma adequada, seguindo rigorosamente as recomendações do fabricante, bem como o posicionamento correto dos painéis para garantir a exposição máxima à luz do sol (KASBURG, 2019, p. 2014). Limpeza regular, a poeira e a sujeira acumuladas nos painéis solares podem bloquear a luz do sol e reduzir a eficiência das células fotovoltaicas. Proteção contra intempéries, as placas solares devem ser protegidas contra tempestades, ventos fortes, granizo e outros danos climáticos. Monitorar o desempenho do sistema de forma regular e realizar manutenção preventiva pode identificar e corrigir problemas antes que causem danos irreparáveis. Existem ainda maneiras de maximizar a potência extraída de cada placa utilizando estruturas de montagem avançada como mostram Steffenon (2020, p. 5670) e Kasburg (2019, p. 2014) em suas pesquisas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A sustentabilidade da matriz energética brasileira é um tema complexo e que depende de diferentes perspectivas e análises. No geral, podemos dizer que a matriz energética do Brasil possui alguns aspectos positivos em termos de sustentabilidade, mas ainda apresenta desafios a serem superados (ISIDORO, 2020, p.73301).

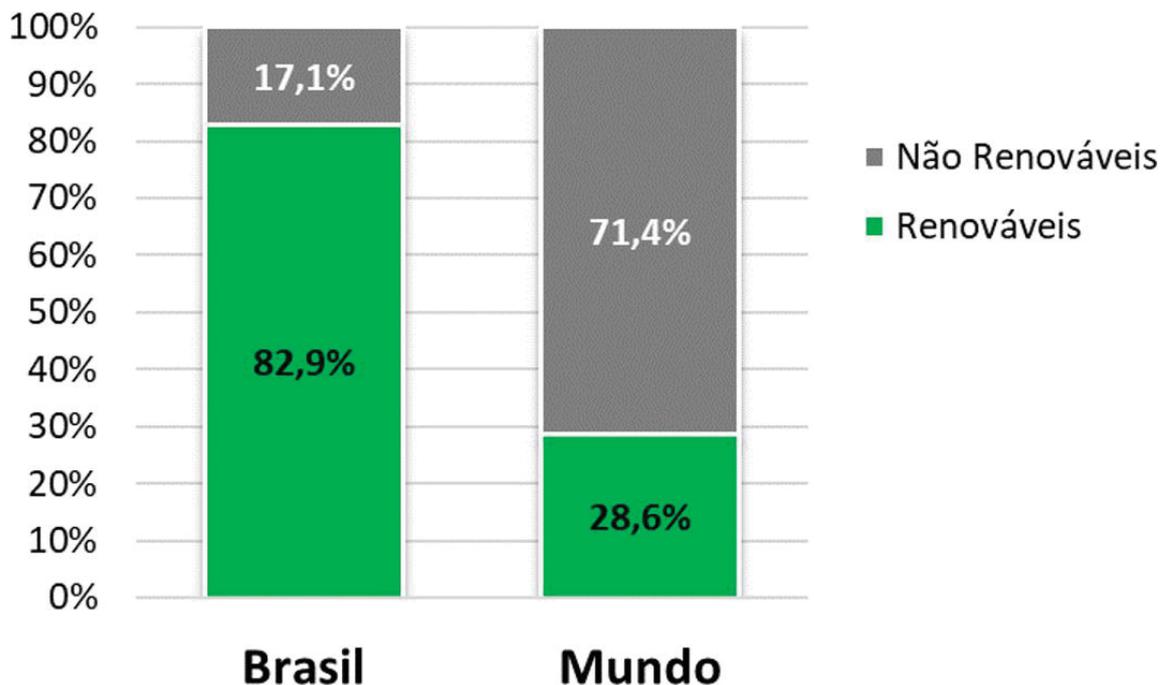
Em relação aos aspectos positivos, o Brasil é um dos países com maior participação de fontes renováveis em sua matriz energética. As fontes hidrelétricas, eólicas, solares e de biomassa são consideradas fontes limpas e renováveis de

energia, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Além disso, segundo Miranda (2019, p. 3) o país possui uma vasta biodiversidade e recursos naturais que podem ser utilizados para a produção de energia limpa e renovável. Por outro lado, a matriz energética brasileira também apresenta alguns desafios em termos de sustentabilidade. A dependência da energia hidrelétrica, por exemplo, pode gerar impactos ambientais significativos, como a construção de grandes barragens e o deslocamento de populações tradicionais e indígenas. Além disso, a exploração de petróleo e gás natural também pode gerar impactos ambientais negativos, como a poluição de mares e rios e a emissão de gases de efeito estufa.

Por fim, é importante destacar que a sustentabilidade da matriz energética brasileira depende não apenas das fontes de energia utilizadas, mas também da forma como essa energia é produzida e consumida. É fundamental que haja um esforço conjunto do governo, da indústria e da sociedade para promover a transição para um modelo energético mais sustentável, que priorize a eficiência energética, a conservação dos recursos naturais e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

FIGURA 1 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA X MUNDIAL



FONTE: EPE (2022)

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A energia hidrelétrica é a principal fonte de energia do Brasil, representando cerca de 60% da matriz energética do país. As usinas hidrelétricas utilizam a força da água para produzir eletricidade.

A energia eólica é a segunda fonte mais importante, respondendo por cerca de 10% da matriz. Ela é gerada a partir da força dos ventos, que movimentam as pás dos aerogeradores, gerando energia elétrica.

Segundo Isidoro (2020, p.73301), a energia solar ainda é uma fonte relativamente nova no Brasil, mas tem crescido bastante nos últimos anos. Atualmente, representa cerca de 2% da matriz. Ela é gerada a partir da captura da energia do sol por meio de painéis fotovoltaicos, que transformam a luz em eletricidade.

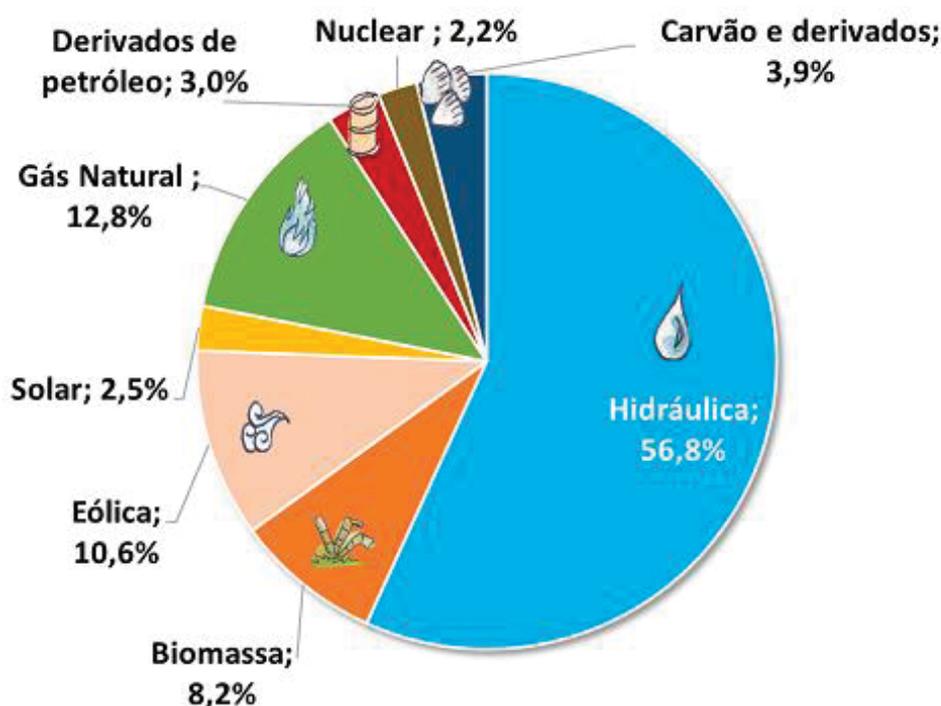
A biomassa é outra fonte importante de energia no Brasil, respondendo por cerca de 9% da matriz. Ela é gerada a partir de resíduos orgânicos, como restos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e outros materiais.

A energia nuclear é responsável por cerca de 2% da matriz energética brasileira. Ela é gerada a partir da fissão nuclear, que libera energia a partir da quebra do núcleo de átomos.

O gás natural e o petróleo também são importantes fontes de energia no Brasil, respondendo juntas por cerca de 17% da matriz. Eles são utilizados principalmente na geração de energia elétrica e no setor industrial.

É importante destacar que a matriz energética brasileira passou por mudanças significativas nos últimos anos, com um aumento expressivo na participação de fontes renováveis, como a energia eólica e solar, e uma redução na dependência de combustíveis fósseis (MIRANDA, 2019, p. 4). Essa transição energética é uma tendência mundial, e o Brasil tem avançado significativamente nesse sentido.

FIGURA 2 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA



FONTE: EPE (2022)

2.2 ENERGIA SOLAR NO MUNDO

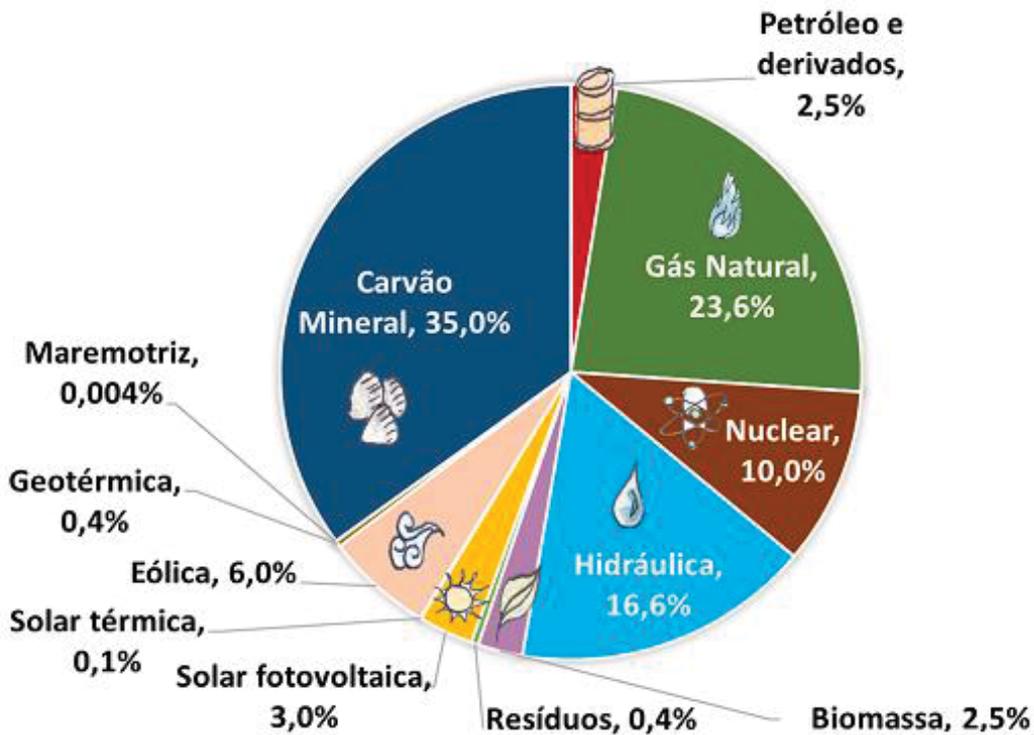
Em 2022, a energia solar alcançou um marco significativo ao ultrapassar a marca de 1 TW de capacidade instalada em todo o mundo. Essa conquista é ainda mais notável quando se considera que a energia solar é agora a segunda fonte de energia mais utilizada no mundo, perdendo apenas para a hidrelétrica (CAL, 2022, p. 1). Isso significa que cada vez mais países estão adotando a energia solar como uma alternativa viável e sustentável aos combustíveis fósseis, e isso está impulsionando o crescimento do setor de energia renovável em todo o mundo. De acordo com Sharma (2018, p. 18204), a energia solar é uma fonte limpa, renovável e de baixo impacto ambiental, o que a torna uma escolha popular para indivíduos e empresas que desejam reduzir sua pegada de carbono e contribuir para um futuro mais sustentável.

De acordo com o Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026 (2022, p.2), um relatório que avalia o progresso do mercado mundial de energia solar, divulgado este ano, é possível notar algumas mudanças nas posições dos principais mercados de energia solar entre 2020 e 2021. A China permanece em primeiro lugar em capacidade instalada, seguida pelos Estados Unidos, Japão, Alemanha e Índia.

A Austrália ocupa agora a sexta posição, enquanto o Brasil aparece em sétimo lugar.

O relatório prevê um crescimento constante no setor de energia solar, com mais de 200 GW de energia solar a serem instalados em todo o mundo até o final de 2022, e a expectativa de chegar a 2 TW até 2025. Esses números são um reflexo do aumento da adoção da energia solar em todo o mundo, impulsionada pela crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade e a busca por fontes de energia limpa e renovável. O Brasil tem um grande potencial para o desenvolvimento da energia solar, e com o crescimento do setor, espera-se que o país suba ainda mais no ranking nos próximos anos

FIGURA 3 – MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL



FONTE: IEA (2022)

2.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

Apesar de ocupar a 14ª posição no ranking de capacidade instalada em energia solar, o Brasil tem mostrado um desempenho notável em termos de crescimento e importância como mercado de energia solar. Como o maior do mundo e único pentacampeão no futebol, o país tem ganhado posições no ranking global de

energia solar. Em 2020, o Brasil entrou no top 10 e, no ano seguinte, subiu para o 7º lugar, sendo o único país latino-americano na lista e considerado um mercado promissor.

Embora a pandemia tenha afetado o crescimento do setor de energia solar em todo o mundo, o Brasil ainda registrou um crescimento de 74% em relação a 2020, com a instalação de 5,5 GW em 2021. Esse número seria ainda maior se não fosse pelos impactos da pandemia. O aumento na adoção da energia solar no Brasil é uma boa notícia, pois é uma fonte limpa e renovável de energia que pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

A energia solar consolidou-se como a terceira maior fonte na matriz energética do Brasil em 2022, alcançando uma marca impressionante de 22 GW de capacidade operacional em novembro. Esse número é a soma dos segmentos de geração distribuída, com 14,986 GW, e geração centralizada, com 7,017 GW. Esse crescimento é uma demonstração do potencial do Brasil no setor de energia solar, bem como a crescente conscientização sobre a importância da energia limpa e renovável na matriz energética do país. A energia solar é uma fonte de energia limpa e sustentável que pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, enquanto fornece energia acessível e confiável.

O Brasil tem uma participação significativa no mercado de extração de silício para painéis fotovoltaicos. Sendo o silício um dos principais materiais usados na fabricação de células solares fotovoltaicas, e o Brasil possui reservas consideráveis desse recurso natural. O país é um dos maiores produtores de silício metalúrgico, que é utilizado como matéria-prima na produção de silício de grau solar, adequado para a fabricação de painéis fotovoltaicos. O Brasil possui jazidas de quartzo de alta qualidade, que são a fonte primária de silício utilizado na indústria solar.

Além disso, o Brasil possui algumas empresas nacionais que estão envolvidas na produção de silício para painéis solares. Essas empresas atuam tanto na extração do silício bruto quanto no processo de purificação e produção do silício de grau solar. Algumas delas também estão envolvidas na fabricação de painéis solares completos.

A participação no mercado de extração de silício para painéis fotovoltaicos traz benefícios econômicos, sociais e ambientais para o Brasil, promovendo o crescimento sustentável e a diversificação da economia.

2.4 NORMATIVAS BRASILEIRAS

Em fevereiro de 2020, o Governo Federal assinou o Decreto nº 10.240/2020, que obriga os fornecedores a arcarem com toda a logística reversa de produtos eletroeletrônicos, incluindo painéis fotovoltaicos, disponibilizando pontos de coleta e dando fim correto àquele material. O Acordo Setorial organiza a implementação das medidas em duas fases, a primeira focada na adesão dos fabricantes, importadores, Unidades Gestoras, comerciantes e distribuidores, e a segunda na habilitação das prestadoras de serviço, elaboração de um plano de educação ambiental e instalação dos pontos de recebimento e/ou consolidação (BRASIL, 2020).

A Instrução Normativa 13 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) inclui os equipamentos eletrônicos na lista de resíduos considerados perigosos, enquanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12.305/2010, estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, abrangendo fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.

No Brasil, a gestão e tratamento de resíduos eletrônicos, incluindo painéis fotovoltaicos, são regulados por diversas normas e leis. O Acordo Setorial de Eletroeletrônicos estabelece a obrigatoriedade de implementação de sistemas de logística reversa para fabricantes, distribuidores e comerciantes, além de contar com a participação do consumidor para o retorno dos produtos após o uso. O Anexo V do Acordo especifica os painéis fotovoltaicos como produtos a serem contemplados por essas medidas.

O artigo 33 da Lei prevê a estruturação e implementação de sistemas de logística reversa pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para o retorno dos produtos e embalagens após o uso pelo consumidor. No entanto, a fiscalização para resíduos eletrônicos ainda é

falha, e o processo de logística reversa não é objeto de controle e fiscalização, exceto para pneus e embalagens de agrotóxicos.

2.5 DIFERENTES TECNOLOGIAS DE PLACAS FOTOVOLTAICAS

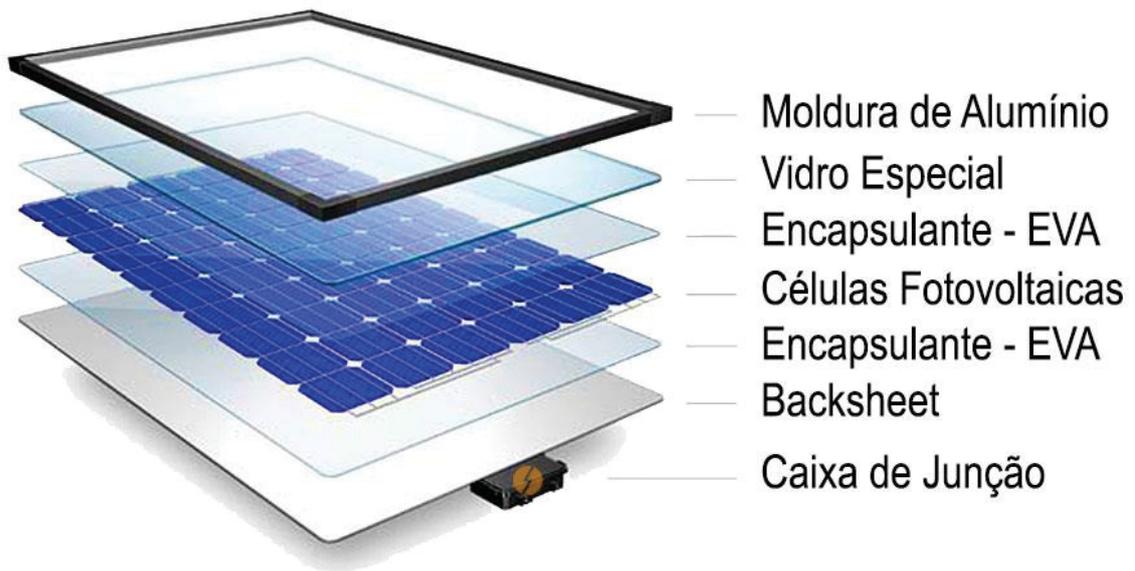
De acordo com Coelho (2018, p. 84) existem três gerações de painéis solares: Silício cristalino, que pode ser monocristalino ou policristalino; Película fina, incluindo silício amorfo, telureto de cádmio e selênio de índio de gálio de cobre (CIGS); e Fotovoltaicos concentradores e tecnologias emergentes, como painéis solares CPV, painéis solares sensibilizados por corante, painéis solares orgânicos e painéis híbridos. Embora os painéis de silício mono e policristalino sejam mais eficientes do que a película fina, eles são atualmente os materiais de painel solar comercial mais amplamente utilizados e espera-se que permaneçam assim.

Os painéis de silício cristalino representavam cerca de 90% do mercado global de PV até 2012 segundo Chowdhury (2020, p. 1), enquanto os painéis solares de terceira geração ainda não foram comercializados em grande escala. Um painel solar típico é composto por um quadro de liga de alumínio, vidro temperado, EVA (copolímero de etileno/vinil acetato) e uma placa de fundo (TPT, cloridrato de topotecana).

2.5.1 Primeira Geração

A primeira geração é composta pelos painéis de silício cristalino, que podem ser monocristalinos ou policristalinos. Esses painéis têm uma alta eficiência de conversão, o que significa que são capazes de converter uma maior porcentagem de energia solar em eletricidade. Embora esses painéis sejam os mais amplamente utilizados comercialmente, eles são também os mais caros em comparação com as outras gerações (XU, 2018, p.1).

FIGURA 4 – COMPOSIÇÃO MÓDULO FOTOVOLTAICO DE PRIMEIRA GERAÇÃO

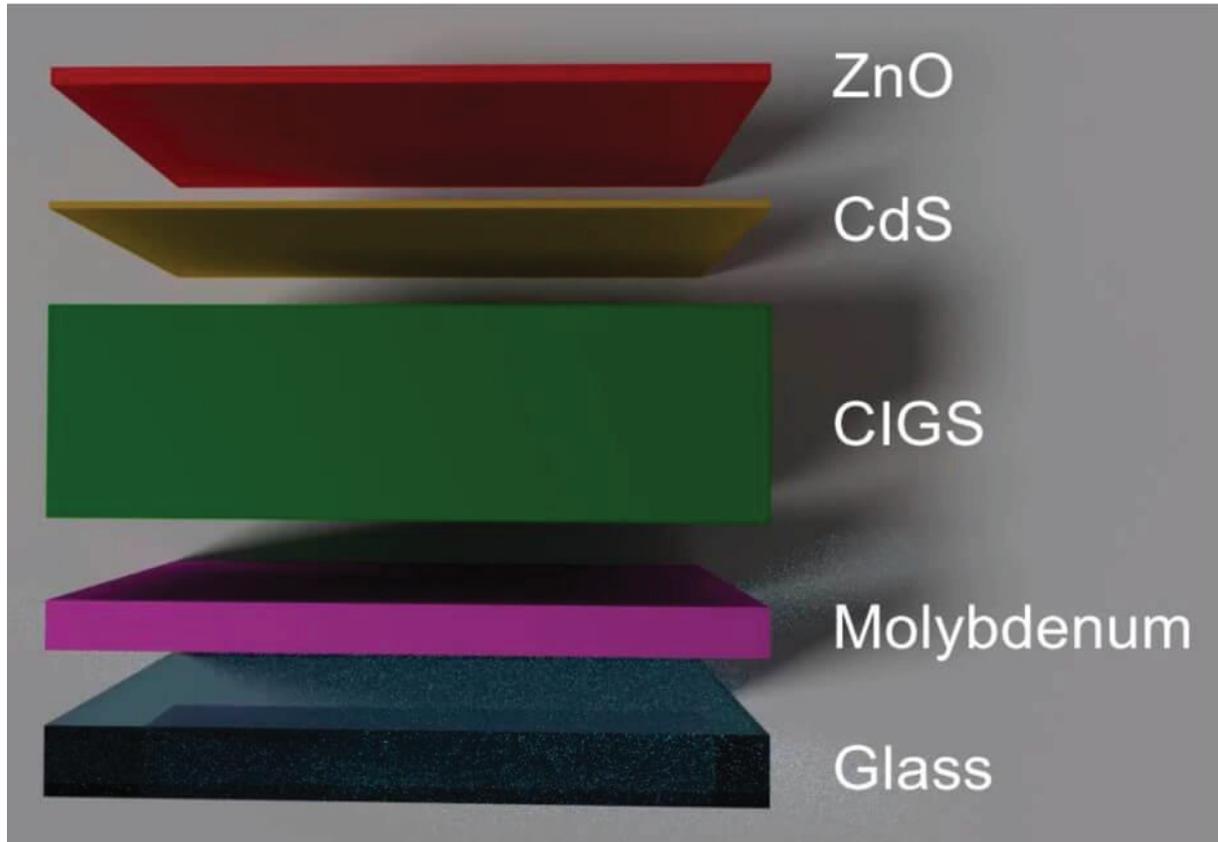


FONTE: PORTAL SOLAR (2023)

2.5.2 Segunda Geração

A segunda geração de painéis solares é formada pelos painéis de película fina. Esses painéis são compostos por materiais como o silício amorfo, o telureto de cádmio e o selênio de índio de gálio de cobre (CIGS). Embora a eficiência desses painéis seja geralmente menor do que a dos painéis de silício cristalino, eles têm um custo menor e são mais leves e flexíveis, o que os torna ideais para aplicações em locais onde o espaço e o peso são limitados (COELHO, 2018, p. 84).

FIGURA 5 – COMPOSIÇÃO MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SEGUNDA GERAÇÃO



FONTE: CANAL SOLAR (2020)

2.5.3 Terceira Geração

A terceira geração de painéis solares é composta por painéis de fotovoltaicos concentradores e tecnologias emergentes, como painéis solares CPV, painéis solares sensibilizados por corante, painéis solares orgânicos e painéis híbridos. Esses painéis são capazes de produzir eletricidade de forma mais eficiente do que as gerações anteriores, mas ainda não foram comercializados em larga escala (GIL, 2019, p. 38).

3 METODOLOGIA

Este artigo consiste em uma análise minuciosa dos processos envolvidos na remoção de materiais perigosos, seguida pela separação e recuperação dos materiais valiosos. Para tal, foi conduzida uma ampla pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, com o objetivo de verificar as tecnologias atuais e potenciais disponíveis para a realização desses procedimentos.

Nesse contexto, foram avaliados os impactos ambientais relacionados aos sistemas fotovoltaicos de silício cristalino, um dos tipos mais comuns de painéis solares utilizados atualmente. Cabe ressaltar que a preocupação com a sustentabilidade ambiental tem se intensificado nos últimos anos, tornando-se um tema crucial em diversas áreas do conhecimento, incluindo a ciência dos materiais.

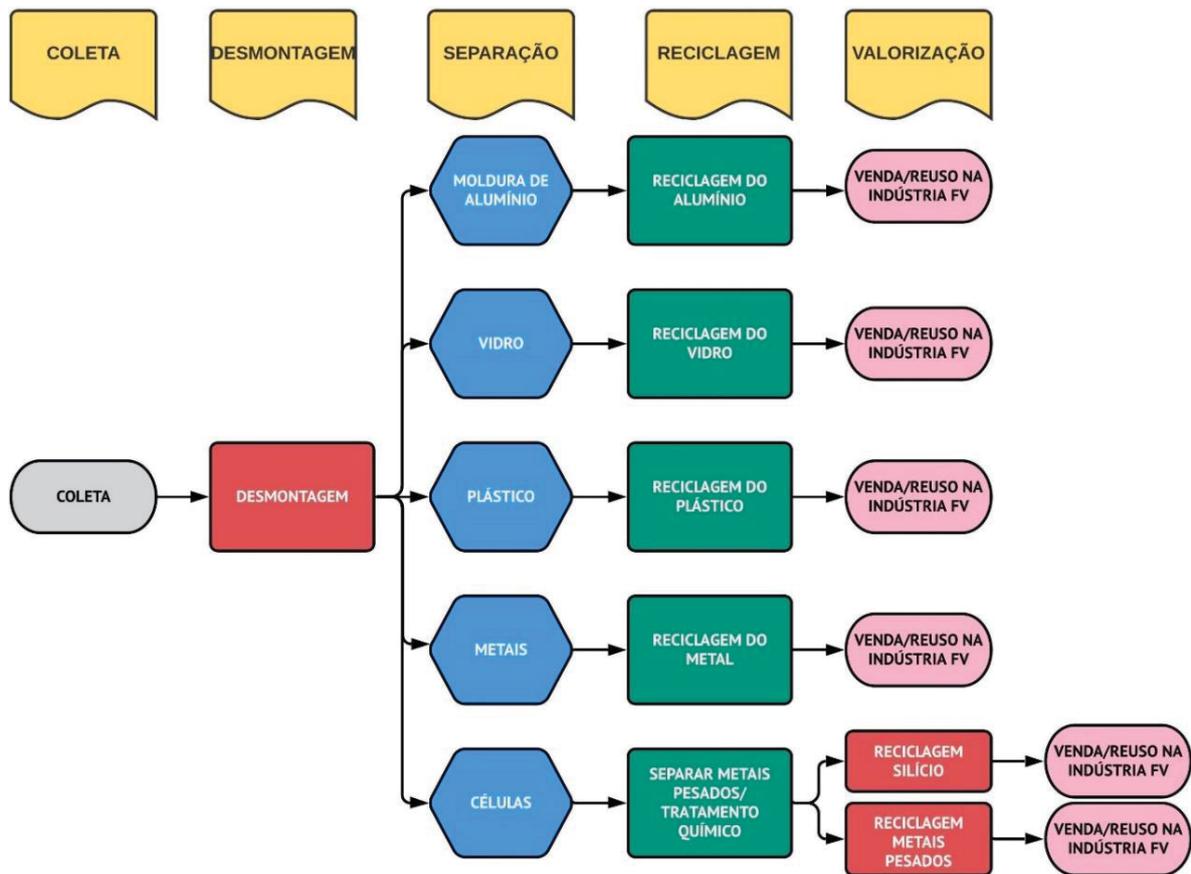
Portanto, é fundamental compreendermos os impactos ambientais associados aos processos de remoção, separação e recuperação de materiais perigosos, bem como buscar alternativas tecnológicas que permitam reduzir esses impactos e promover a sustentabilidade ambiental em nossa sociedade. O presente estudo contribui para essa discussão ao oferecer uma análise aprofundada e atualizada desses processos e dos impactos ambientais associados a eles.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A Europa é líder no mercado de reciclagem de painéis solares devido à sua adoção precoce e aceitação pelos consumidores como demonstra Magalhães (2020, p.8). A Alemanha instalou os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede no início dos anos 90 e, desde então, tem sido um grande impulsionador do mercado de reciclagem de painéis solares na Europa.

Além disso, vários países europeus, como a Alemanha e o Reino Unido, têm medidas governamentais para regular o processo de reciclagem, o que impulsiona ainda mais o crescimento do mercado. Acredita-se que os avanços tecnológicos em reciclagem, que aumentam a taxa de reciclagem, vão alimentar a demanda do mercado nos próximos anos.

A Alemanha é um exemplo de país que está investindo em tecnologia de reciclagem. A empresa Geltz Umelt-Technology (2023) criou uma planta de reciclagem de painéis solares, patrocinada pela União Europeia, que está localizada no sul da Alemanha. Além de reciclar painéis solares, a empresa também é especializada no tratamento de água e na recuperação de metais preciosos.



FONTE: ENERGÊS (2020)

4.1 MÉTODO MECÂNICO

A separação mecânica dos componentes de um módulo fotovoltaico é uma das etapas mais importantes no processo de reciclagem dos materiais. A separação é realizada com a ajuda de máquinas especiais, que usam diferentes técnicas de separação, como a trituração, a separação por densidade, a separação magnética e a separação por cor (CAL, 2022, p. 1).

Após a desmontagem da estrutura de alumínio, o primeiro passo é a trituração dos módulos fotovoltaicos, que reduz o material a pequenos pedaços. Em seguida, esses pedaços são separados em diferentes frações usando técnicas de separação mecânica, como a separação por densidade (GRANATA, 2016, 240).

A separação por densidade é realizada usando uma mesa vibratória que usa vibrações para separar diferentes materiais por densidade. Os materiais mais

densos, como o vidro, se separam dos materiais menos densos, como os polímeros e as células fotovoltaicas (GRANATA, 2016, 240).

De acordo com a empresa Descarte Legal (2019, p.1), a separação magnética é outra técnica usada para separar os componentes de um módulo fotovoltaico. Os componentes metálicos são separados usando um ímã, que atrai o material metálico enquanto o resto dos materiais são separados.

Por fim, a separação por cor é usada para separar diferentes polímeros, que são identificados por cores diferentes. Isso é feito usando uma câmera que reconhece a cor do material e, em seguida, direciona-o para a fração correta.

Segundo Cooper (2018, p.18) em geral, o processo de separação mecânica é uma etapa importante no processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos e ajuda a recuperar materiais valiosos para serem reutilizados.

4.2 MÉTODO QUÍMICO

Segundo Cal (2022, p. 1), a reciclagem de módulos fotovoltaicos pelo método químico é outro processo utilizado para separar e recuperar os materiais presentes nos painéis solares. Este método envolve a utilização de soluções químicas para dissolver os componentes do painel, permitindo a separação dos materiais.

Como Xhao (2020, p.5) demonstra, o processo começa com a trituração dos módulos fotovoltaicos para que os materiais possam ser separados com mais facilidade. Em seguida, as células solares e outros componentes são colocados em uma solução química, que dissolve os materiais presentes no painel.

A solução química é geralmente ácida e é escolhida de acordo com os componentes a serem dissolvidos. Por exemplo, o ácido clorídrico pode ser usado para dissolver o vidro, enquanto o ácido nítrico pode ser usado para dissolver os metais.

Depois que os materiais são dissolvidos, a solução é filtrada e separada em diferentes frações. Os metais são recuperados da solução, geralmente por meio de processos eletroquímicos ou de precipitação, enquanto os polímeros e outros materiais são recuperados separadamente.

Embora a reciclagem por método químico possa ser mais eficaz na recuperação dos materiais, ela também pode ser mais custosa e requer cuidados

especiais para garantir que os resíduos químicos sejam tratados adequadamente. Por isso, a escolha do método de reciclagem mais apropriado depende das características do painel solar a ser reciclado, da quantidade de painéis a serem reciclados e das políticas ambientais e regulamentações locais (PAFNANELLI, 2016, p.8).

4.3 MÉTODO TÉRMICO

Azumo (2019, p. 315) mostra que o método térmico é outra técnica utilizada na reciclagem de módulos fotovoltaicos. Esse método envolve o uso de altas temperaturas para separar os diferentes materiais presentes nos módulos.

No trabalho de Macalova (2020, p.5) o processo começa com a trituração dos módulos fotovoltaicos, seguida pela separação dos componentes de metal, vidro e plástico. Em seguida, esses materiais são levados para um forno onde são aquecidos a uma temperatura elevada, geralmente acima de 1000°C.

A alta temperatura faz com que o vidro se derreta e se separe dos outros materiais, formando um vidro líquido que é coletado em um recipiente separado. Os componentes de metal e plástico, por sua vez, são queimados em uma atmosfera controlada, o que permite a separação dos metais dos polímeros (MACALOVA, 2020, p.5).

Os metais são então separados e coletados para serem reutilizados em outras aplicações, enquanto os polímeros queimados são transformados em gás e usados como combustível para o forno ou recuperados como energia elétrica.

Embora o método térmico possa ser eficaz na reciclagem de módulos fotovoltaicos, ele pode ser menos sustentável do que outros métodos, como a separação mecânica, porque consome mais energia e emite mais gases de efeito estufa. Portanto, é importante que os métodos de reciclagem sejam avaliados com base em sua eficácia, mas também em sua sustentabilidade.

Para o estudo em questão é importante mencionar que em média, os painéis solares de silício pesam cerca de 20 kg e contêm aproximadamente 76% de vidro, 10% de plástico, 8% de alumínio, 5% de sílica e 1% de outros metais (GIL, 2019, p. 38).

Em seu artigo, Mahmoudi et al. (2019, p.8) realizaram uma pesquisa quantitativa abrangendo publicações globais sobre o fim de vida dos painéis

fotovoltaicos em diferentes países. A análise incluiu tópicos como políticas, gestão, projeção de volume de resíduos, análise do ciclo de vida e logística reversa. A pesquisa refinada resultou na seleção de 70 artigos publicados entre 2000 e 2017. Os autores concluíram que, embora existam estudos internacionais sobre diversos aspectos do fim de vida dos painéis solares, apenas 16% dos estudos específicos por país apresentam estimativas de fluxo de resíduos. Os autores consideram que há necessidade de mais estudos sobre a gestão de resíduos fotovoltaicos em outros países para promover estratégias mais eficientes e eficazes. Eles também destacam a necessidade de um sistema global que monitore o volume de resíduos e as possibilidades de tratamento em diferentes escalas para incentivar pesquisas que encontrem soluções para a gestão desse tipo de resíduo.

Duflou et al. (2020, p. 6) conduziram um estudo sobre o fim de vida dos sistemas fotovoltaicos. Os autores observaram que, dentre os materiais analisados, apenas uma parcela do vidro, alumínio, cobre e aço pôde ser recuperada e reintroduzida no ciclo de vida, enquanto as células e os plásticos foram incinerados ou depositados em aterros. Devido à complexidade da separação de materiais presentes nos painéis, a reciclagem de todos os componentes do sistema pode ser comprometida. No entanto, empresas como a PV Cycle, uma organização sem fins lucrativos, já assumem a responsabilidade por essa etapa do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, gerenciando o processo de reciclagem de todo o sistema, desde os painéis até as baterias, além de outros resíduos eletrônicos.

O estudo de Azeumo et al. (2019, p. 315) aborda os métodos hidrometalúrgico e térmico para o tratamento de módulos fotovoltaicos no fim de sua vida útil. Os autores caracterizam o método hidrometalúrgico como mais complexo, enquanto o térmico (também conhecido como pirometalúrgico) é tido como o mais impactante para o meio ambiente, devido ao maior consumo de energia, emissão de gases e poeira. O artigo apresenta uma revisão de técnicas de tratamento utilizadas por algumas empresas, como o tratamento térmico para separar as camadas do módulo, terceirização do tratamento da moldura de alumínio e do vidro, tratamento da célula com ácido para dissolver as camadas metálicas, dissolução do EVA para obtenção do silício puro, tratamento químico com solvente em diferentes temperaturas para separar as camadas de vidro, silício e EVA, desmontagem manual da moldura de alumínio e da caixa de junção, e corte do módulo em amostras homogêneas para facilitar sua operação. Os autores apresentam uma

metodologia para a reciclagem do painel fotovoltaico, e concluem que tolueno e xileno são os melhores solventes para a dissolução do EVA com base em resultados de testes realizados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os volumes atuais de resíduos de painéis fotovoltaicos obsoletos ainda sejam baixos, é essencial que haja uma estratégia de gestão holística para lidar com esses resíduos de forma sustentável. De fato, muitos estudos têm sido realizados em todo o mundo para desenvolver alternativas para a separação e reciclagem desses produtos, o que indica uma curva de aprendizado acelerada na indústria. No entanto, a reciclagem de equipamentos fotovoltaicos ainda apresenta desafios, e os métodos precisam ser aprimorados para garantir uma cadeia de valor adequada e sustentável. Apesar disso, já existem empresas e entidades trabalhando nesse campo que poderiam ser parceiras de potenciais interessados em promover a reciclagem desses equipamentos.

Além disso, é fundamental analisar o impacto ambiental dessas alternativas de fim de vida, a fim de comparar a desmontagem e reciclagem do sistema obsoleto com seu descarte ou incineração e avaliar qual estratégia causa menor impacto ambiental. No Brasil, algumas normativas estão sendo desenvolvidas para a gestão de resíduos de equipamentos fotovoltaicos em fim de vida, o que demonstra um alinhamento com os princípios do desenvolvimento sustentável e uma preocupação com o impacto ambiental causado pela obsolescência desses sistemas. Muitos estudos, especialmente em âmbito internacional, já propõem alternativas para a separação e reciclagem de sistemas fotovoltaicos em fim de vida, evidenciando a complexidade dessa questão e a necessidade de mais pesquisas. É fundamental considerar o impacto ambiental dessas alternativas de fim de vida para avaliar a compensação entre a desmontagem e reciclagem do sistema obsoleto e seu descarte ou incineração, a fim de identificar as estratégias mais sustentáveis. Ademais, a análise de algumas regulamentações vigentes indica que no Brasil já estão sendo adotadas medidas para gerir esses produtos em fim de vida, demonstrando uma certa consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável e uma preocupação com o impacto ambiental decorrente da obsolescência desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- AZEUMO, Maurianne Flore et al. **Photovoltaic module recycling, a physical and chemical recovery process**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 193, p.314-319, 2019.
- BRASIL, No; SOLAR, Energia. **Sobre o cenário de fim de vida do sistema**. 2019.
- CAL, Michele; HAJJI, Bekkay; NITTO, Gioele; et al. applied sciences **The Design Value for Recycling End-of-Life Photovoltaic Panels**. 2022.
- CHOWDHURY, Shahariar; SAJEDUR, Kazi; CHOWDHURY, Tanjia. **An overview of solar photovoltaic panels ' end-of-life material recycling**. Energy Strategy Reviews, v. 27, p. 100431, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>>.
- COELHO, Thays Fernandes, Revista Meio Ambiente ; VERS, Sustentabilidade; AS, Resumo. **Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais**. v. 15, 2018.
- COOPERA, Apoio. Anais do VII Congresso Brasileiro sobre **Gestão do Ciclo de Vida**. v. I, .
- DESCARTE LEGAL**. Encontre empresas licenciadas para descartar seus resíduos. 2019. Disponível em: descartelegal.com.
- DUFLOU, Joost R; PEETERS, Jef R; ALTAMIRANO, Diego; et al. CIRP Annals - **Manufacturing Technology Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery**. 2018.
- ENERGÊS, **Reciclagem de módulos fotovoltaicos. é possível?** Disponível em: <<https://energes.com.br/reciclagem-de-modulo-fotovoltaicos-e-possivel/>>.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>.
- GIL, Luis, EQUIPMENT, Electronic. **O fim de vida dos módulos fotovoltaicos**. p. 36–40, 2019.
- IEA - **Energy Statistics Data Browser – Data Tools**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>>.
- GELTZ UMWELT-TECHNOLOGIE | **Geltz Umwelt-Technologie GmbH**. Disponível em: <<https://geltz.de/en/welcome-to-geltz-umwelt-technologie/>>. Acesso em: 7 maio. 2023.

GRANATA, G; PAGNANELLI, F; MOSCARDINI, E; et al. **Solar Energy Materials & Solar Cells Recycling of photovoltaic panels by physical operations**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 123, n. 2014, p. 239–248, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>>.

ISIDORO, Marcelo Henrique. **Brazilian Journal of Development Brazilian Journal of Development**. p. 73294–73309, 2020.

KASBURG, C.; STEFENON, S. F. **Deep Learning for Photovoltaic Generation Forecast in Active Solar Trackers**. IEEE Latin America Transactions, v. 17, p. 2013-2019, 2019.

MACALOVA et al. 2020, I O P Conference; SCIENCE, **Materials. Recycling of photovoltaic panels - A review of the current trends**. 2020.

MAGALHÃES, Luísa; TVSHYPNS, H I; IRIVKME, H I; et al. **A importância da Economia Circular**.p. 8–9, .

MAHMOUDI, Sajjad; HUDA, Nazmul; BEHNIA, Masud. **Resources , Conservation & Recycling Photovoltaic waste assessment : Forecasting and screening of emerging waste in Australia**. Resources, Conservation & Recycling, v. 146, n. October 2018, p. 192–205, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.039>>

MAJEWSKI, Peter; AL-SHAMMARI, Weam; DUDLEY, Michael; et al. **Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches**. Energy Policy, v. 149, n. November 2020, p. 112062, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>>.

MIRANDA, Rosana Teixeira; DA, Francielle; LEANDRO, Silva; et al. **Gestão Do Fim De Vida De Módulos Fotovoltaicos**. v.8, n.1, p. 364-383, 2019.

PADOAN, Flavia C S M; ALTIMARI, Pietro; PAGNANELLI, Francesca. **Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development**. Solar Energy, v. 177, n. July 2018, p. 746–761, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003>>.

PAGNANELLI, Francesca; MOSCARDINI, Emanuela; GRANATA, Giuseppe; et al. **Physical and chemical treatment of end of life panels : An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies**. Waste Management, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.011>>.

PORTAL SOLAR - **Passo a passo da fabricação do painel solar - Tudo sobre energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>.

SHARMA, Rajat; GUPTA, Ayush; NANDAN, Gopal; et al. ScienceDirect **Life span and overall performance enhancement of Solar Photovoltaic cell using water as coolant: A recent review**. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 9, p. 18202–18210, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.156>>.

SOLARPOWER EUROPE, **Global Market Outlook For Solar Power 2022-2026**. Disponível em: <<https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2022>>.

STEFENON, S. F. ; KASBURG, C. ; NIED, A. ; KLAAR, A. C. R. ; FERREIRA, F. C. S. ; BRANCO, N. W. **Hybrid deep learning for power generation forecasting in active solar trackers**. IET Generation Transmission & Distribution, v. 14, p. 5667-5674, 2020.

VILLALVA, A. M. Canal Solar, **Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>>.

XU, Yan; LI, Jinhui; TAN, Quanyin; et al. **Global status of recycling waste solar panels: A review**. Waste Management, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>>.

ZHAO, Pengfei; GUO, Junwei; YAN, Guanghui; et al. **A novel and efficient method for resources recycling in waste photovoltaic panels: High voltage pulse crushing**. Journal of Cleaner Production, v. 257, p. 120442, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120442>>.