

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA SPERRY BEDIN TONINI

ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS

CURITIBA (PR)

2024

MARIANA SPERRY BEDIN TONINI

ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Pós-Graduação MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA (PR)

2024

RESUMO

A necessidade crescente de produção de energia elétrica, aliada ao apelo ecológico, tem promovido a inclusão da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira em substituição às fontes fósseis. Mas, ao mesmo tempo que traz energia renovável de forma abundante, os módulos fotovoltaicos podem trazer pontos negativos ao final de sua vida útil. É fundamental analisar os impactos futuros de seus componentes, no que se refere ao período pós ciclo de vida, visto que a expectativa de vida útil de um módulo fotovoltaico é de 25 a 30 anos. No Brasil, este produto é enquadrado como lixo eletrônico e o descarte incorreto pode se tornar um problema sério. Este estudo analisa aspectos sobre a reciclagem dos componentes e traz alternativas que minimizam os impactos ambientais. Também, propõe perspectivas para aprimorar o processo, como a integração interdisciplinar e o estabelecimento de regulamentações, bem como enfatiza a necessidade de analisar outro ponto de vista, como o meio de fabricação e logística reversa. Esses são fatores essenciais para evitar o descarte inadequado dos módulos, o qual, pode comprometer a sustentabilidade do setor, demandando uma abordagem estratégica e uma gestão eficiente.

Palavras-chave: sustentabilidade; energia renovável; reciclagem.

ABSTRACT

The need for electricity production, combined with ecological appeal, has promoted the increasing inclusion of photovoltaic solar energy in Brazilian energy matrix as a replacing fossil fuels. However, while it brings renewable energy abundantly, it may also present negative points at the end of its useful life. It is crucial to analyze the future impacts of its components regarding the post-lifespan period, since the expected lifespan of a photovoltaic module is 25 to 30 years. In Brazil, this product is classified as electronic waste, and improper disposal could become a serious issue. This study analyzes aspects of the recycling of components and presents alternatives that minimize environmental impacts. It also proposes perspectives to improve the process, such as interdisciplinary integration and the establishment of regulations, as well as emphasizes the need to consider another perspective, such as the means of manufacturing and reverse logistics. These are essential factors to prevent the improper disposal of modules, which could compromise the sector's sustainability, requiring a strategic approach and efficient management.

Key words: sustainability; renewable energy; recycling.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia no mundo está em constante crescimento devido ao aumento populacional e industrial, Goldemberg (2008) cita que o aumento da demanda energética está relacionado com o aumento na qualidade de vida da população. Concomitantemente, há uma crescente busca por fontes de energia renováveis com foco na diminuição dos impactos ambientais e exploração dos recursos finitos (Cruz, 2020).

A energia proveniente do sol já é utilizada pelo ser humano para garantir necessidades básicas como aquecimento, iluminação e alimentação. Além disso, nos últimos anos, tem apresentado uma expansão significativa de sua representatividade na matriz energética brasileira através da geração de energia elétrica. O Brasil conta com uma série de aspectos positivos para implementação desta fonte de energia, que serão apresentadas no decorrer deste artigo.

Em concordância com Maia (2020), o foco da indústria atualmente está voltado a aspectos econômicos: produzir para atender as demandas do mercado. Porém, assim como qualquer produto, o descarte dos equipamentos utilizados para geração de energia, pós vida útil, deve ser estruturado de modo que toda cadeia produtiva se mantenha com o mesmo apelo de sustentabilidade.

Ao analisar-se a composição dos módulos fotovoltaicos (FV), os metais que os compõem causam grande impacto ambiental quando descartados de maneira equivocada. Esse descarte incorreto pode ocasionar prejuízos a fauna e flora, através do processo de lixiviação, que consiste no transporte de elementos químicos para profundidades do solo (Prado, 2018).

Este artigo tem como objetivo principal apresentar e revisar as partes e peças integrantes de um módulo fotovoltaico, componente importante para geração de energia através da luz do sol e compreender possíveis formas para seu descarte final, de forma viável em relação à eficiência das etapas no processo completo. Segundo Miranda (2019), as previsões demonstram um crescimento acentuado dos resíduos de células fotovoltaicas e, por este motivo, existe a necessidade de quantificar o potencial de conservação e projeção dos descartes futuros.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

A busca dos brasileiros pela produção de sua própria energia teve início após os grandes aumentos no custo de energia elétrica no Brasil, devido aos frequentes apagões durante os anos de 2002 a 2010 (Dias, 2017). Porém, foi através da regulamentação normativa 482/2012, (a qual definiu a geração através de micro e minigeração) que houve um aumento da prospecção de fontes de energia renovável (PortalSolar, 2024).

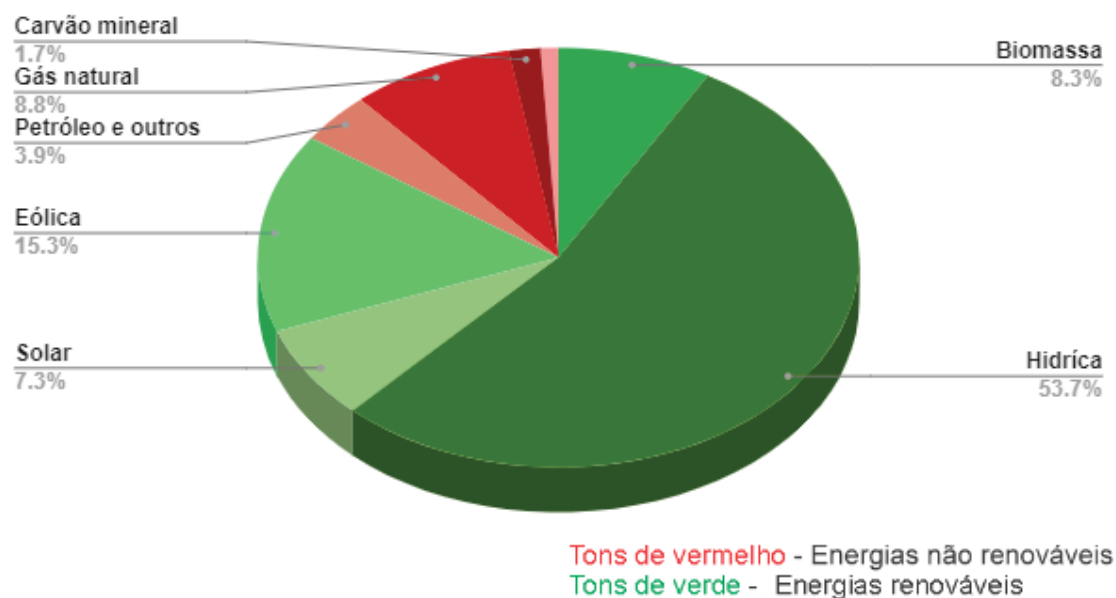
As energias renováveis podem ser definidas através das suas características de renovação natural no meio ambiente e de causarem pouco ou nenhum impacto ambiental. Como exemplo, podem ser citadas a energia solar, eólica, biomassa, geotérmica, maremotriz e hidrelétricas.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, no ano de 2012 o Brasil possuía 11 usinas solares instaladas com capacidade instalada de 8MW, os quais representavam 0,01% da matriz energética do país (MEE, 2012), sem a separação entre energia renovável ou não renovável para descrição da matriz. Já em 2016, a representação da geração de energia solar cresceu para 0,1%, e houve a separação das fontes, onde a energia renovável alcançou 78,4% da matriz (MME, 2016).

De acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA (ANEEL, 2024), em julho de 2024 a geração de energia solar representava 7,28% da capacidade instalada no Brasil, enquanto a matriz energética contava com 84,65% de geração através de energias renováveis, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Composição da Matriz energética brasileira até julho - 2024

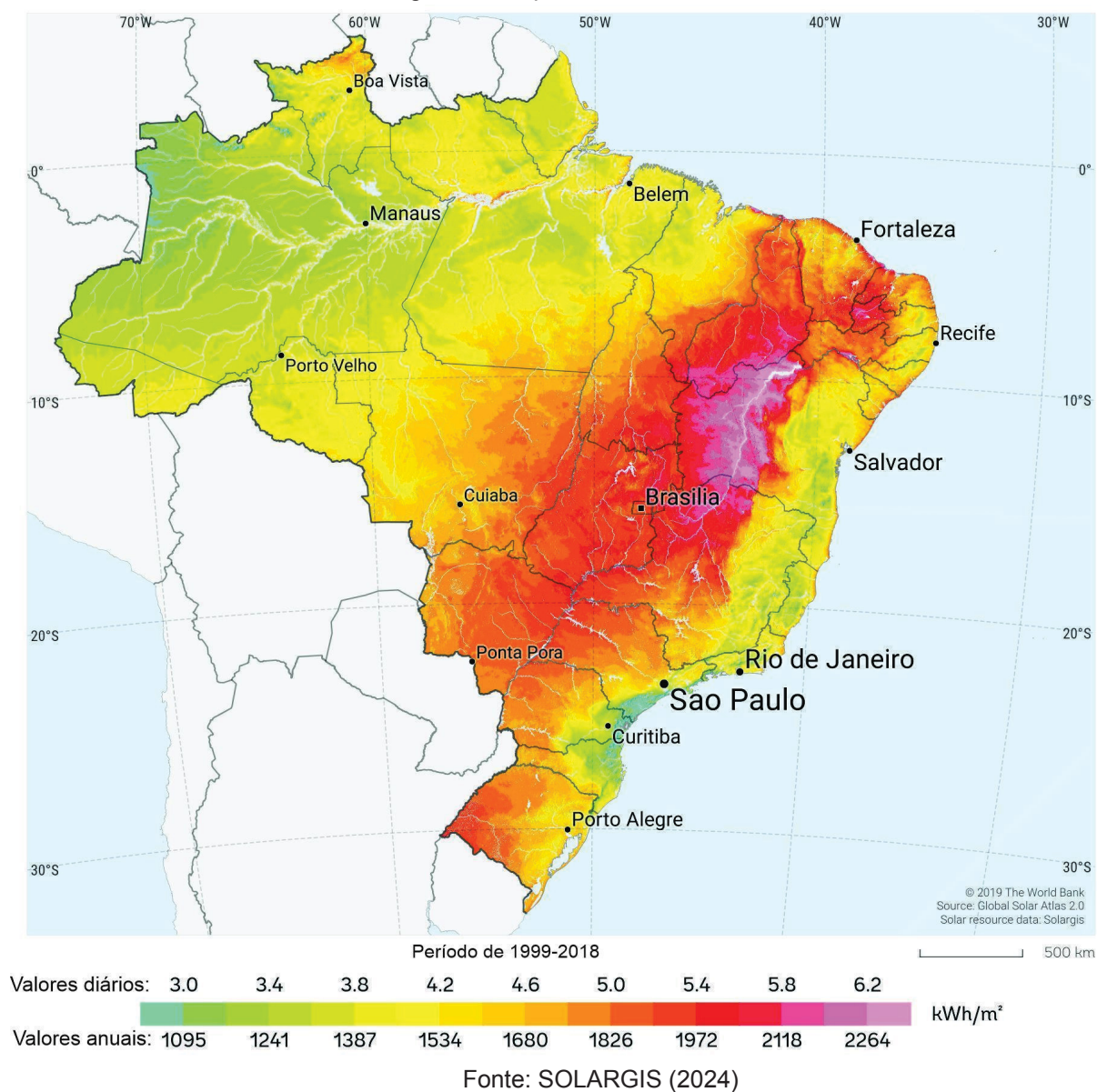
Matriz Energética Brasileira



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A Figura 2 demonstra o grande potencial apresentado pelo Brasil para geração de energia através da radiação solar. A cor rosa em tom mais claro indica o maior índice de radiação diária média, em torno de $6,2 \text{ kWh/m}^2$, presente nos estados da Bahia, Minas Gerais e Piauí. Subsequente, pode-se entender que há uma faixa adjacente a estes estados que cortam o país e apresentam bons índices, variando em torno de $4,2$ a $5,8 \text{ kWh/m}^2$.

Figura 2 - Mapa solarimétrico do Brasil



Outro aspecto importante que faz com que o consumidor final se interesse pela própria geração de energia elétrica é o aumento no custo da tarifa de energia. De acordo com o panorama nacional emitido pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE (EPE, 2023), observa-se o aumento linear do custo, de acordo com as regiões do país, conforme Tabela 1. Comparando-se o primeiro ano de intervalo da tabela com o último (2014 e 2023), houve um aumento médio de 232,5% da tarifa nas regiões do país, com a região Norte apresentando a maior variação nesta comparação, atingindo um aumento de 429 R\$/MWh. Em contrapartida, a região Sul

foi a que suportou a menor oscilação da tarifa, atingindo um aumento de 322 R\$/MWh no período de 9 anos e a única que teve variação negativa entre os anos de 2022 a 2023, onde houve redução de 14 R\$/MWh.

Tabela 1 - Tarifa média de energia elétrica por Região (R\$/MWh)

Tarifa média por Região (R\$/MWh)						
Região	2014	2016	2018	2020	2022	2023
Centro-Oeste	274	419	489	518	671	697
Nordeste	269	367	451	479	604	618
Norte	304	420	533	567	679	733
Sudeste	282	442	482	527	653	653
Sul	264	415	456	481	600	586
Média Brasil	277	419	475	511	637	644

Fonte: Adaptado pela autora (EPE, 2023)

Os aspectos favoráveis apresentados fizeram com que o Brasil tenha alcançado, em 2023, o sexto lugar na geração de energia solar fotovoltaica mundial de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - ABSOLAR (ABSOLAR, 2024), com 37,4 GW de capacidade instalada, ficando atrás de países como a China, com 609,3 GW, seguidos dos Estados Unidos (137,7GW), Japão (87,7GW), Alemanha (81,7GW) e a Índia (72,7GW).

De acordo com a S&P Global (2024), estima-se que o investimento global em energia solar fotovoltaica deve atingir US\$ 500 bilhões até o final de 2024. Esses dados são compatíveis com o aumento de 31% na produção de energia solar FV nos Estados Unidos até maio de 2024 e com a previsão da instalação de 240 GW em energia solar neste ano pela China. Os analistas da Commodity Insight (2024) assumem que entre 2024 e 2030, haverá uma adição de 4,3TW de energia solar fotovoltaica no mundo.

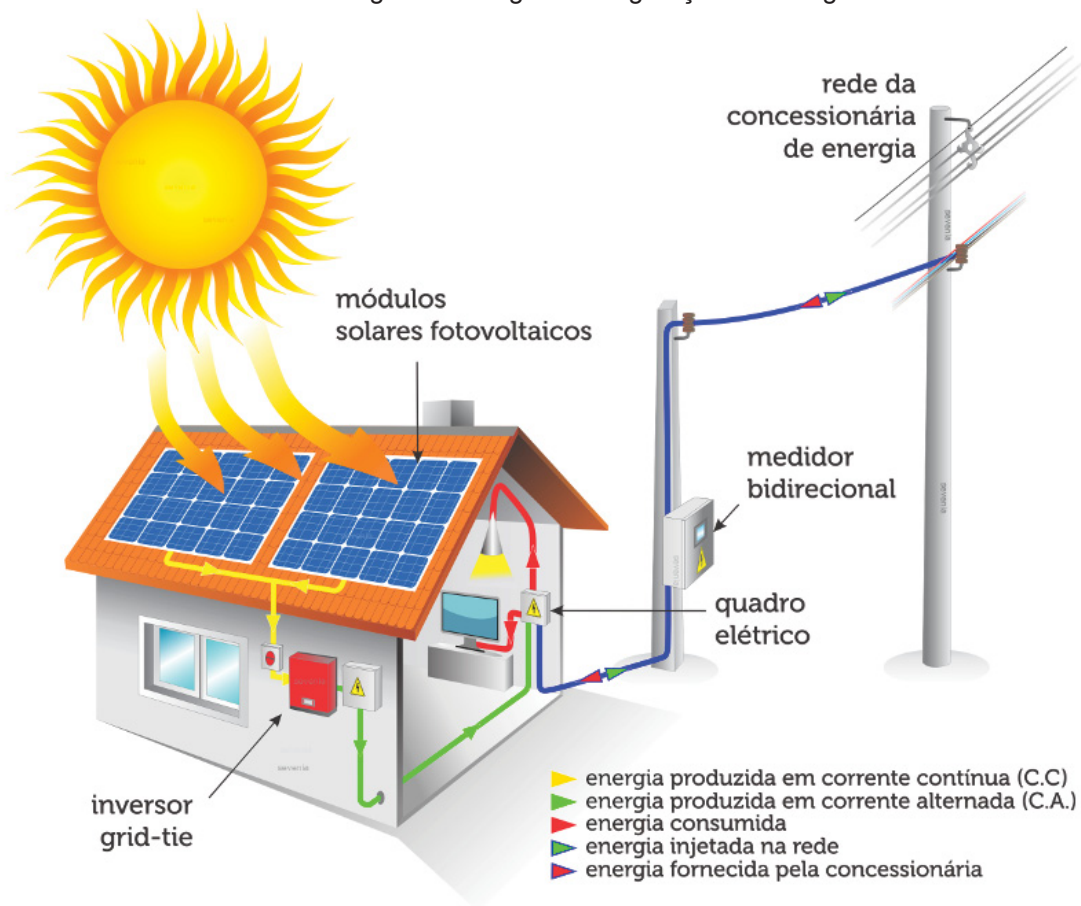
2.2 FUNCIONAMENTO DA ENERGIA SOLAR

A energia solar é convertida em dois tipos de energia: a energia térmica e a energia fotovoltaica. A energia térmica não gera eletricidade e é obtida por coletores de água, através de tubos ou placas e reservatórios térmicos. A radiação solar

aquece a água presente neste sistema para ser armazenada no reservatório e usada posteriormente.

Já a energia fotovoltaica, demonstrada na Figura 3, consiste na conversão da energia solar em energia elétrica, através dos módulos fotovoltaicos. Os fótons, presentes nos raios solares, incidem sobre os módulos fotovoltaicos, gerando uma diferença de potencial nas células fotovoltaicas, criando assim, a circulação de corrente contínua quando conectados a uma carga. Essa conexão ocorre através do inversor solar, encarregado de transformar a corrente contínua em corrente alternada, para fornecer energia útil aos equipamentos eletrônicos como geladeira, lâmpadas, chuveiro e outros.

Figura 3 - Diagrama da geração de energia solar



Fonte: LuzSolar (2017)

A produção de energia fotovoltaica pode ser dividida em duas categorias: a Geração Centralizada (GC) e a Geração Distribuída (GD). A GC corresponde a

gerações para comercialização em leilões promovidos pela ANEEL, em larga escala. Já a GD é representada por sistemas distribuídos próximos à carga e o processo ocorre através da concessionária de energia local.

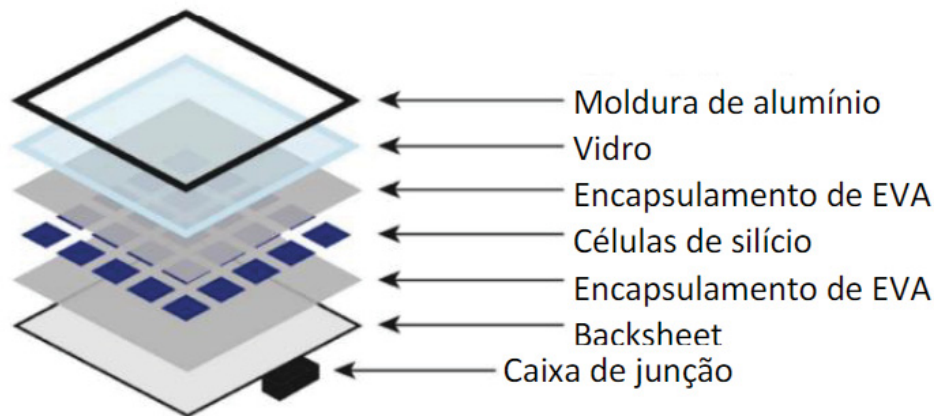
Visto isso, compreende-se que a geração de energia através do Sol já é uma realidade no Brasil e no mundo e por isso há necessidade observar como serão realizados os descartes, pós vida útil de cada componente.

2.2.1 Estrutura dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por converter a energia do sol em energia elétrica e são compostos por um agrupamento de células para alcançar as características elétricas desejadas às aplicações. Os modelos mais conhecidos, segundo Miranda (2019), são os classificados como de primeira geração, os quais são compostos por silício cristalino (c-Si) de estrutura monocristalina ou policristalina.

Para compreender melhor os métodos de reciclagem deste componente, há a necessidade de se identificar quais são os materiais que o compõem e qual solução pode ser aplicada em cada caso. De forma geral, a célula fotovoltaica é montada como um “wafer”, constituída de Silício e conectada por contatos metálicos como cobre e prata para transmissão dos elétrons. Posteriormente, é encapsulada por um vidro temperado com alto teor de transparência para proteção, Acetato de Etil Vinila (EVA) para proteção da célula contra umidade e um filme fino isolante, denominado de “backsheet”, composto por polímeros. Estas camadas são envolvidas por uma moldura externa de alumínio para impossibilitar a entrada de água e partículas. Por fim, na parte inferior há as conexões elétricas na caixa de junção. A ordem dos componentes é apresentada através da Figura 4.

Imagem 4 - Camadas de um módulo fotovoltaico



Fonte: Maia (2022)

Segundo Maia (2022), a densidade do módulo fotovoltaico é de $13,7\text{kg/m}^3$ e o vidro representa 68% da massa do componente, a moldura de alumínio 17% e os 15% restantes divididos da seguinte maneira: 6,8% EVA, 6,1% de captadores, 0,8% de backsheet, 0,6% contatos posteriores, 0,4% de contatos frontais e $<0,1\%$ de revestimento (Maia, 2022). Portanto, nota-se que um módulo fotovoltaico possui uma grande diversidade de peças, além de partes com diferentes componentes. A diversidade da composição dos módulos fotovoltaicos faz com que haja a necessidade de se realizar as análises de vida útil e forma correta de descarte dos mesmos ao fim de suas vidas úteis.

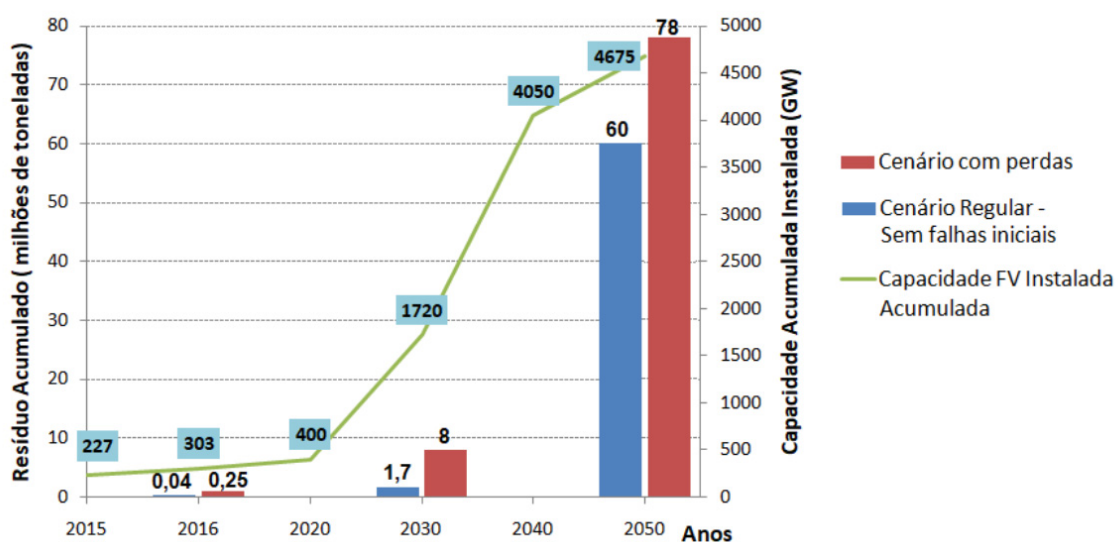
2.3 GESTÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS AO FIM DE SUA VIDA ÚTIL

Juntamente ao expressivo crescimento do setor fotovoltaico, verifica-se que os fabricantes também estão investindo nos processos de fabricação e aumento da eficiência dos componentes, fazendo a degradação anual de geração ser de 0,4%. Ou seja, segundo Braga (2021), a expectativa de vida útil dos módulos FV pode chegar a 50 anos, variando de acordo com sua aplicação, instalação, regime de operação e condições de transporte.

É esperado que o descomissionamento, ou seja, o processo de desativação de cada componente da produção, se torne gradual ao longo dos anos. Miranda

(2019) relata que a taxa de resíduo dos módulos fotovoltaicos gerados atualmente é de 0,1% a 0,6% se comparado com a tonelada instalada, e acrescenta que esta taxa crescerá em até 14% até 2023 e alcançará 80% em 2050. A Figura 5 representa dois cenários estimados de descarte de módulos FV de 2015 a 2050. O cenário regular, representado em azul, trata-se do descarte após o fim da vida útil atingindo 60 milhões de toneladas em 2050. O cenário em vermelho descreve a projeção que admite falhas e descartes antes do final da vida útil do componente. Nesse contexto pode-se alcançar patamares de 78 milhões de toneladas a serem descartadas.

Figura 5 - Projeção de toneladas de módulos descartados e GW instalados



Fonte: Miranda (2019)

2.3.1 Gestão dos 4Rs

Devido ao montante dos volumes de descarte dos módulos FV gerados há a necessidade de se discutir a sua gestão após o fim da vida útil dos mesmos. Conforme Cruz (2020), o estudo dos 4R's, pode criar valor na cadeia de produção industrial e mostra diferentes estratégias, sendo classificadas em redução, reuso, reciclagem e recuperação de energia.

O primeiro processo enfatiza a necessidade de investimento em pesquisa para desenvolvimento de novas tecnologias pois trata da redução no uso das

matérias primas na fabricação do componente, visto que, os módulos FV apresentam materiais pesados em sua composição, como o chumbo e a prata. Esses metais são caracterizados como raros e têm grande potencial de acúmulo no meio ambiente e são caracterizados como metais raros (Maia, 2022).

O segundo R se refere ao Reuso dos componentes, os quais poderiam ser reutilizados mesmo após a vida útil do equipamento. A empresa alemã Second Sol, por exemplo, é a maior revendedora de peças de reposição na Europa, com mais de 250.000 peças de reposição e 45 mil usuários. A empresa realiza diversos procedimentos de avaliação a fim de garantir a qualidade dos equipamentos revendidos. Como inspeção visual, testes de alta qualidade de performance, teste de luminescência, que verifica dados na estrutura das células, teste de diodos, além do chamado HiPot test, o qual analisa a resistência de isolamento de modo a garantir a qualidade dos produtos que serão revendidos (SecondSol, 2024).

A terceira estratégia passível de utilização é a Reciclagem, uma vez que 90% dos componentes podem ser reciclados. Nesse caso pode-se aplicar um método de avaliação de cadeia denominado de berço ao berço (C2C), o qual trata de criar uma política de logística reversa ao fabricante para realizar um circuito fechado em um ecossistema limpo, baseado na análise de ciclo de vida (ACV), utilizando-se como referência a ISO14044, a qual define elementos importantes como os recursos, produtos e etapas do ciclo de vida de cada produto. O Silício por exemplo, pode ser utilizado para criação de novas células. Aqui deve ser considerada a toxicidade dos materiais, caracterizados por tóxicos e não tóxicos.

Por fim, a etapa quatro (Recuperação de Energia) indica a possibilidade da realização da queima de resíduos para geração de energia elétrica e aproveitamento energético.

2.3.2 Método de separação dos materiais

A reciclagem (um dos “4R” discutidos anteriormente) é um dos processos empregados para a separação dos materiais dos módulos fotovoltaicos. Primeiro, separa-se a estrutura externa e realiza-se o processo de delaminação (separação do vidro e das células do encapsulante) para que os materiais sejam enriquecidos e

processados de acordo com sua matéria-prima. Segundo Su (2024), a delaminação pode ocorrer através de processos físicos, térmicos e químicos. Dentre os processos físicos pode-se citar a aplicação do britador rotativo ou britador martelo, desvitrificação e esmagamento de pulso de alta tensão. Essas etapas realizadas apenas uma vez, não são suficientes para atingir a alta purificação e, por isso, demandam mais do que um processo de delaminação. Já a delaminação térmica reduz a geração de substâncias fluoradas e resulta em uma completa remoção do EVA, obtida através de altas ou baixas temperaturas, com ou sem a presença de oxigênio e podendo variar de três minutos a uma hora de aplicação, dependendo do processo. Por fim, há a delaminação química que é menos recomendada pois usa solventes químicos para dissolver ou inchar o EVA. Além disso, demanda custos mais elevados de reagentes para uma rápida resposta, ou consumo prolongado destes insumos devido ao tempo esperado de reação, que é de aproximadamente 10 dias para a separação.

Para se obter uma delaminação mais eficaz, Sanathi (2024) sugere a aplicação da delaminação mista, com a combinação de dois dos três métodos citados anteriormente, diminuindo assim as perdas de cada processo e aumentando a eficácia.

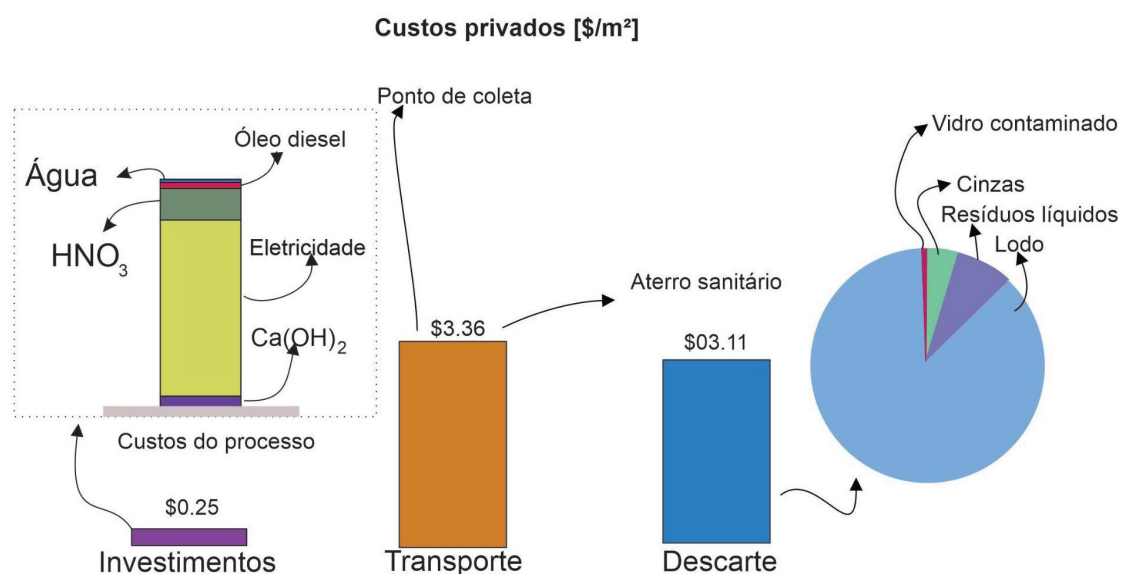
Após a remoção do EVA e da parte inferior do módulo fotovoltaico, as partículas de vidro, as células solares e as tiras de solda se misturam e devem passar por mais um processo de separação. Este processo pode ser realizado através de um separador eletrostático, que age através da diferença de condutividade dos materiais, ou através de uma máquina de separação óptica, através da separação baseada nas cores dos materiais, para que cada componente seja purificado e recuperado conforme suas características (Su, 2024).

2.4 QUANTIFICANDO O PROCESSO DE RECICLAGEM

A possibilidade de recuperar materiais e adicionar um benefício econômico nos módulos é caminho para continuar desenvolvendo formas e etapas para a reciclagem, porém há pouca informação sobre os custos e ganhos deste processo. De acordo com Markert (2020), o custo privado para gerenciamento do final da vida

útil de um módulos fotovoltaico de silício cristalino pode ser resumido na Figura 6, é de US\$6,7/m², considerando 49,25% custos de transporte (US\$3,3/m²), 46,27% custo com aterro (US\$3,1/m²) e apenas 4,48% custos com o processo de reciclagem (US\$ 0,3/m²) (eletricidade e materiais consumidos). Ainda pode ser adicionado a este custo US\$5,2/m², dependendo do processo de reciclagem e dos materiais que demandam.

Figura 6 - Custos privados com reciclagem dos módulos FV



Fonte: Adaptado de Markert (2020)

O ganho variável na venda de todos os materiais reciclados é de 12,5 à 50% acima do custo no processo de reciclagem, sendo em média US\$13,62/m² (Markert, 2020). Afirmando a necessidade de desenvolvimentos dos métodos para melhor eficiência e aprimoramento dos processos a fim de ampliar os ganhos.

2.5 POLÍTICAS DE GESTÃO APLICADAS

Muitos países já estão desenvolvendo processos visando o pós-vida útil dos módulos com a importância devida. A Alemanha, Reino Unido e alguns estados dos Estados Unidos possuem regulamentações e aplicabilidades no processo de

reciclagem. A União Europeia baseia a responsabilidade para o produtor, os quais, são responsáveis pela coleta e reciclagem. A Coreia não possui uma regulamentação específica para módulos fotovoltaicos, porém, está desenvolvendo pesquisas de tecnologias com essa finalidade (Miranda, 2019). Já o maior utilizador de energia fotovoltaica, a China desenvolveu inúmeros padrões para reciclagem e reutilização destes materiais. Em 2024, atribuiu um código de resíduos e normas específicas para entrada, armazenamento, descarte e controle de poluição do produto (Su, 2024).

No Brasil os módulos fotovoltaicos não são classificados por nenhuma lei ou norma vigente com relação à correta indicação para destinação final e, por esse motivo, acabam sendo classificados como resíduos elétricos e eletrônicos, considerando a NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Lei 12.305 de 02/08/2010, que relata a Política Nacional de Resíduos Sólidos de acordo com a periculosidade. Portanto, os módulos FV e seus componentes muitas vezes são descartados de forma equivocada.

Apesar do descarte inadequado na maior parte dos casos, há algumas empresas e entidades atuantes na correta destinação final destes componentes. Um exemplo é a PV Cycle, organização sem fins lucrativos fundada em 2007, que atua no mundo inteiro e oferece coleta, tratamento e consultoria de resíduos, incluindo os módulos fotovoltaicos. No ano de 2023 a PV Cycle processou mais de 14.541 toneladas de resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos e tem estimativa de processar 150.000 toneladas até 2030 (PV Cycle, 2024). No Brasil, a empresa SunR tem parceria com a PV Cycle e é pioneira na reciclagem dos módulos FV na América Latina. Segundo Neves (2024), até agosto de 2024 a SunR foi responsável pela reciclagem de 91 mil módulos, representando 45 MWp ou 2.800 toneladas. Montante que ultrapassa o volume recebido nos últimos quatro anos. Exemplos como estes demonstram que produzir energia verde a partir do sol pode ter um ciclo completo de sustentabilidade.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos assuntos abordados neste artigo, compreende-se a elevada necessidade no aumento da geração de energia elétrica para suprir a alta demanda da população.

Aliado à sustentabilidade e diversidade da matriz elétrica brasileira, as energias renováveis são o futuro. Porém, há de se observar alguns cuidados com o descarte pós vida útil dos módulos fotovoltaicos, não apenas o caracterizando como resíduo inútil e o descartando sem fiscalização. É fundamental a adoção de políticas e instrumentos de regularização para que não haja mais problemas ambientais ocasionados através da exposição de materiais tóxicos. Além disso, a interação multidisciplinar é crucial no desenvolvimento das etapas de descarte de módulos FV, visto que os métodos atuais de reciclagem ainda estão em seus estágios iniciais e demandam pesquisas e otimizações nos processos. Há a necessidade de se desenvolver células e módulos fotovoltaicos com uma maior facilidade de reciclagem e, desta forma, possibilitar a venda de materiais secundários para também contribuir com a redução da pegada de carbono no processo completo.

A gestão do fim da vida útil destes componentes é uma oportunidade para criação de valores e novas demandas de emprego conforme aplicação do método dos 4R's mencionado anteriormente. Dessa forma, pode-se manter o título de energia limpa ao se estabelecer uma cadeia completa da indústria de reciclagem, incluindo a desmontagem completa, transporte, produção de reciclagem e fluxo final para usinas de energia fotovoltaica de larga escala até a geração descentralizada, como em telhados residenciais.

Nas próximas décadas a energia solar será fonte importante de energia para a humanidade e compreendeu-se que a reciclagem deste componente é uma tarefa complexa. Mas, pesquisadores do mundo todo tem feito um processo gradual com diferentes estratégias e técnicas para superar obstáculos a fim de garantir o propósito final de proteger o meio ambiente e tornar a vida mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA- ABSOLAR. **Brasil sobe 2 degraus e atinge 6º lugar no ranking Irena de capacidade solar instalada.** Disponível em:

<[<https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-bol-uol-com-br-noticias-2024-04-08-brasil-sobe-2-degraus-e-atinge-6-lugar-no-ranking-irena-de-capacidade-solar-instalada-hm/#:~:text=O%20Brasil%20subiu%20duas%20posi%C3%A7%C3%B5es,as%20Energias%20Renov%C3%A1veis%20\(Irena\)>](https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-bol-uol-com-br-noticias-2024-04-08-brasil-sobe-2-degraus-e-atinge-6-lugar-no-ranking-irena-de-capacidade-solar-instalada-hm/#:~:text=O%20Brasil%20subiu%20duas%20posi%C3%A7%C3%B5es,as%20Energias%20Renov%C3%A1veis%20(Irena))>. Acesso em 15 set. 2024;

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Matriz Renováveis / Não renováveis.** Disponível em:

<[>. Acesso em 04 ago. 2024;](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9)

BRAGA, F. R. et al. **Análise de degradação de painéis fotovoltaicos.** Revista Mundi, p. 01-24, 2021.

CRUZ, F. T.; ISIDORO, M. H.; FERNANDES, I. S. E.. **Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos.** Brazilian Journal of Development, p. 73294 - 73307, 2020;

DIAS, C. T. de C. et al. **Energia solar no Brasil.** p. 153-165, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, **Anuário Estatístico de energia Elétrica 2024 - Ano base 2023.** Disponível em:

<[>. Acesso em: 04 ago. 2024;](https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#Cap%C3%ADtulo_2:_Panorama_Nacional)

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP, 2008;

Luz Solar. **Como funciona o sistema fotovoltaico?** Disponível em: <<https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>> Acesso em: 15 set.2024;

MAIA, A. G. F.; VARELLA, F. K. DE O. M. **Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil.** p. 66-76, 2022;

MARKERT, E.; CELIK, I.; APUL, D. **Private and externality costs and benefits of recycling crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels.** Energies, v.13, p.3650, 2020;

MIRANDA, R. T., LEANDRO, F. DA S., SILVA, T. C.. **Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.8, p. 365-383, 2019;

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro Boletim Dezembro/2012**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2012/boletim_de_monitoramento_do_sistema_elxtrico_-_dezembro2_-2012.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2024;

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileir Boletim Dezembro/2016**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2016/boletim-de-monitoramento-do-sistema-elfffdtrico-dezembro-2016.pdf>>. Acesso em 04 ago. 2024;

NEVES, L. **SunR amplia sua atuação na reciclagem de painéis para a América Latina em parceria com a PV Cycle**. Disponível em <https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/08/26/sunr-amplia-sua-atuacao-na-reciclagem-de-paineis-para-a-america-latina-em-parceria-com-a-pv-cycle/?utm_source=dlvr.it&utm_medium=linkedin>. Acesso em 06 de out. de 2024;

PORTALSOLAR, **Dados do Mercado de Energia Solar no Brasil**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em:14 set. 2024;

PRADO, P. F. de A. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. Dissertação - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2018;

PV CYCLE, **Annual report 2023**. Disponível em: <https://www.hilarious.be/pvcycle-report2023/Content/pdf/PV-Cycle_AnnualReport2023_EN.pdf>. Acesso em: 05 de out. 2024;

SANATHI, R., BRANERJEE, S., BHOWMIK, S., **A technical review of crystalline silicon photovoltaic module recycling**. Solar Energy, v.281, 2024;

SECONDSOL, **The photovoltaik marketplace**. Disponível em: <<https://www.secondsol.com/en/index.htm>>. Acesso em 18 ago. 2024;

S&P GLOBAL, **How the exponential growth of solar will help shape global power markets**. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/electric-power/070524-exponential-growth-solar-shape-global-power-markets>>. Acesso em 03 de out. 2024;

SOLARGIS, **Global Solar Atlas.** Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-6.402648,-90.703125,3>. Acesso em 08 ago. 2024;

SU, P. et al. **Advancements in end-of-life crystalline silicon photovoltaic module recycling: Current state and future prospects.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v.277, 2024.