

CADEIA DE VALOR NA RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Nicolli Sperança Silveira – nicollisperanca@gmail.com

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Programa de Pós Graduação em Sistemas de Energia - PPGSE

Resumo. *Com a expansão da geração fotovoltaica em todo o mundo, espera-se que a capacidade instalada global atinja 4.500GW em 2050. Este mercado cresce de forma significativa durante os anos, e o volume dos módulos fotovoltaicos, componente utilizado para a conversão da energia solar em energia elétrica também aumenta. Desta forma, o aumento dos resíduos gerados com o final da vida útil desses sistemas representa um desafio ambiental para a aplicação de novas políticas públicas, além da geração de novas oportunidades com a reinserção destes materiais que podem ser reciclados em uma nova cadeia de valor. O potencial disponível para o mercado de resíduos fotovoltaicos até 2030 representa cerca de 8 toneladas de matérias-primas que poderão ser inseridas e aproveitadas na fabricação de 60 milhões de novos módulos, porém apenas a União Europeia possui regulamentos específicos aplicados aos resíduos fotovoltaicos. Os diferentes componentes podem ser aproveitados em novas indústrias, como a indústria de vidro, metal, e até mesmo na indústria fotovoltaica. O Brasil, apesar de sua localização privilegiada para geração fotovoltaica, encontra dificuldades na implementação da tecnologia de reaproveitamento desses resíduos por não possuir políticas públicas específicas para a atividade. O país pode utilizar políticas públicas já consolidadas, podendo ter como exemplo a União Europeia que realiza e propõe um controle dos próprios fabricantes que fornecem em seu território sobre estes módulos desativados e/ou avariados. O sucesso de um sistema de reciclagem bem estruturado que resultará em novas cadeias de valor dependerá da correta manipulação pelas partes envolvidas no processo, que deverão possuir suas responsabilidades como cliente, fornecedor e fabricantes definidas e estipuladas por normas vigentes. Este estudo tem como objetivo apresentar as oportunidades na cadeia de valor da reciclagem dos módulos fotovoltaicos, bem como demonstrar as políticas já existentes e realizar uma análise crítica e comparativa.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Reciclagem, Cadeia de Valor*

1. INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica cresce em todo o mundo. Segundo os dados da Agência Internacional para Energias Renováveis (IRENA – International Renewable Energy Agency) espera-se que em 2050 a capacidade instalada global atinja 4.500GW. No Balanço Energético Nacional 2021 (BEN-2021), a energia solar fotovoltaica demonstra um crescimento expressivo, no ano de 2019 era representada por 1,0% na matriz elétrica brasileira e em 2020 subiu para 1,66%. Além de sua representatividade ter aumentado consideravelmente, a geração de energia solar no ano de 2020 atingiu 4.764 GWh de geração e 4.635 MW de potência instalada no território brasileiro.

O mercado está aumentando de forma significativa ao longo dos anos, desta forma o volume de módulos fotovoltaicos também aumenta. No relatório End-of-life Management publicado pela IRENA, no fim do ano de 2016 eram esperados de 43,5 a 250 toneladas de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos, representando um volume entre 0,1 e 0,6% da massa de todos os painéis instalados globalmente.

O aumento dos resíduos provenientes da utilização dos módulos fotovoltaicos representa um desafio ambiental para implantação de políticas públicas, mas também apresenta oportunidades para a reinserção destes materiais que podem ser reciclados em uma nova cadeia de valor.

Na Fig. 1 adaptada da IRENA (2016) é possível verificar o valor em potencial que estará disponível para o mercado de resíduos fotovoltaicos nas próximas décadas. Estima-se uma projeção de acúmulo de resíduos de até 8 toneladas até 2030 e um acumulado destes resíduos para produzir 60 milhões de novos módulos. Porém, apenas a União Europeia - UE possui regulamentos específicos para os resíduos fotovoltaicos; os demais países classificam os módulos fotovoltaicos nas políticas para os resíduos gerais, industriais ou como no caso do Brasil, resíduos eletrônicos.

A política da UE regulamenta a coleta, recuperação e reciclagem para os módulos, além de utilizar do princípio de responsabilidade de produção estendida. A diretiva de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos de 2012 - WEEE (2012) exige que os fabricantes que fornecem para a UE financiem os custos de coleta e reciclagem dos módulos implementados em seu território.

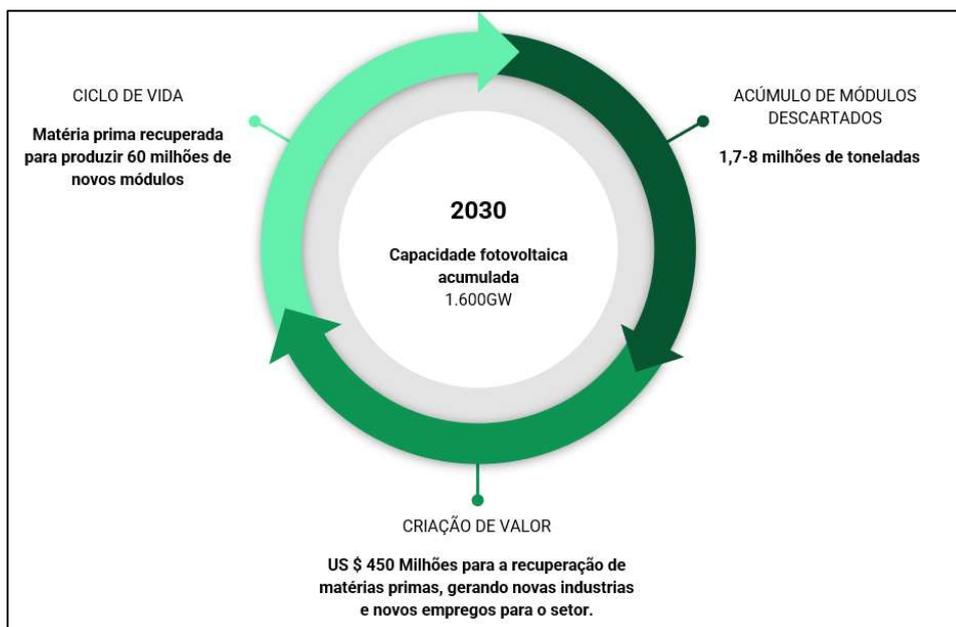


Figura 1 -Potencial da recuperação dos módulos fotovoltaicos até o ano de 2030.

A reciclagem dos módulos pode representar uma importante componente para reinserção de diversos materiais nas cadeias de valor, uma vez que o módulo possui diferentes componentes e matérias-primas com alto valor agregado. Estes materiais podem ser aplicados em novos módulos ou em indústrias específicas, como nas indústrias de vidro, construção, entre outras. Segundo os relatórios da IRENA (2016), as matérias-primas reutilizadas podem possuir um valor agregado de até 450 milhões de dólares até 2030, desenvolvendo novas indústrias e empregos no setor fotovoltaico.

As principais falhas apontadas pelos consumidores em um sistema fotovoltaico, de acordo com uma pesquisa realizada pelo IRENA (2016), incluem a degradação, problemas derivados de montagem inadequada dos sistemas e falhas nos equipamentos elétricos, como caixas de junção, string box, inversores e cabeamento.

As causas das falhas encontradas nos 12 primeiros anos dos módulos estão relacionadas à degradação, descolamento, delaminação e isolamento do vidro. As principais causas observadas incluem a exposição a cargas mecânicas, mudanças de temperatura que podem provocar quebra no vidro e quebra na interconexão das células. Na Fig. 2 adaptado do IEA-PVPS (2014) estão representadas as principais falhas de acordo com as reclamações dos consumidores.

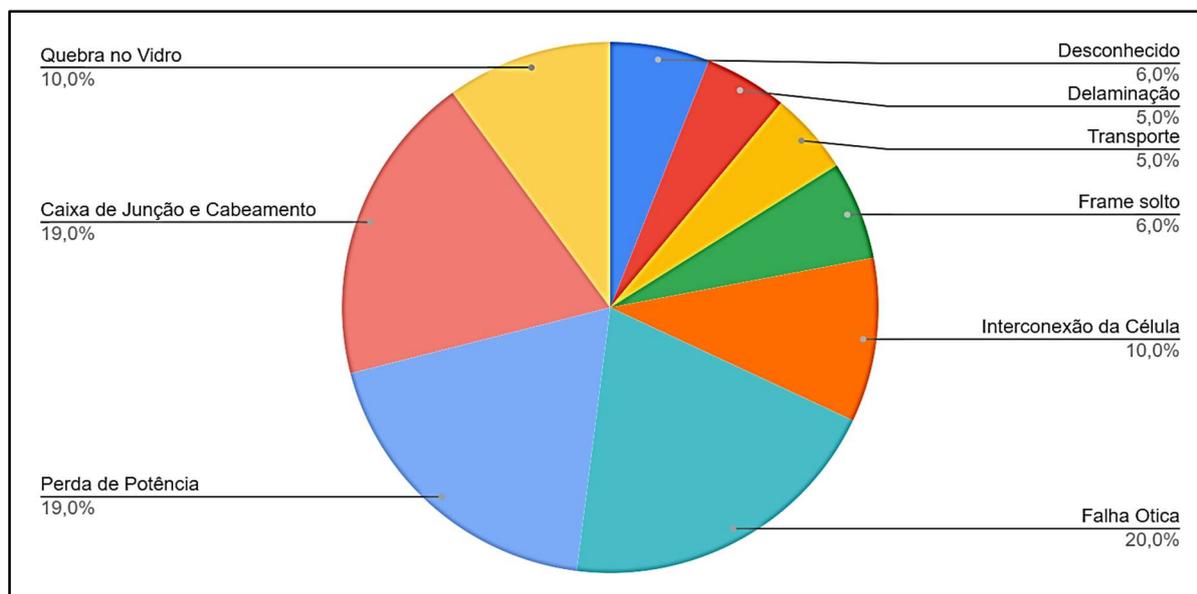


Figura 2 - Principais falhas em módulos fotovoltaicos.

Na Fig. 3 pode ser verificado alguns exemplos de módulos com avarias e que podem ser inseridos em um processo de reciclagem.

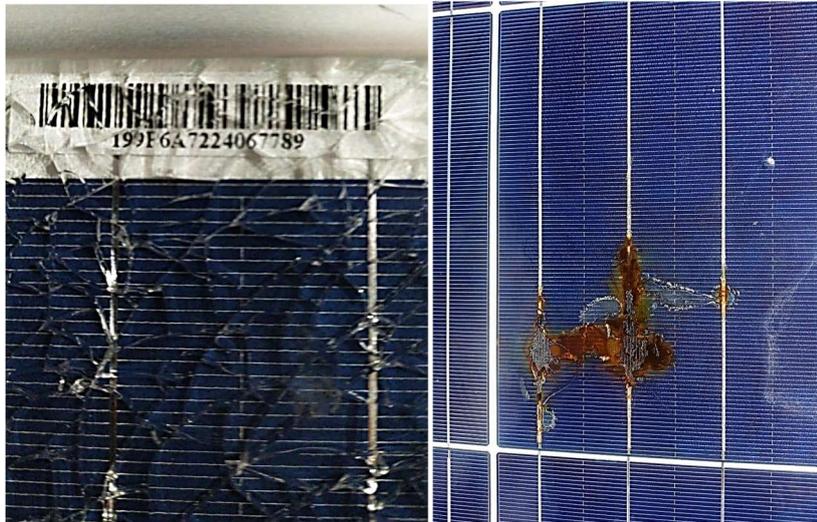


Figura 3 – Módulos Avariados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o Pinho e Galdino (2014) a geração de energia fotovoltaica é composta pelo módulo fotovoltaico, responsável pela conversão direta da radiação solar em eletricidade, um inversor, que será responsável pela conversão de energia de corrente contínua em alternada e pelos dispositivos de proteção, como chaves seccionadoras, fusíveis e os dispositivos de proteção contra surtos.

2.1 Módulo Fotovoltaico

Fraidenraich e Lyra (1995) explica que os módulos fotovoltaicos são fabricados com materiais semicondutores que possuem um conjunto de células fotovoltaicas responsáveis por executar a conversão da luz solar incidente em energia elétrica. Os fótons de luz excitam os elétrons que saltam para as camadas de condução originando tensão e corrente elétrica. O material semicondutor utilizado libera os elétrons onde as células possuem camadas semicondutoras carregadas positivamente e negativamente. Quando a luz incide sobre o material, o campo elétrico entre as junções inicia um fluxo de energia gerando uma corrente contínua. Seu funcionamento está ligado diretamente a disponibilidade de irradiação solar, desta forma, quanto maior o nível de irradiação maior será a geração de energia.

De acordo com os dados disponibilizados pelo BNDES Setorial (2014), o material semicondutor mais empregado na produção dos módulos é o silício, presente em cerca de 95% de todos os módulos fotovoltaicos no mundo. O domínio da tecnologia deste material já está amplamente difundido, além de ter reservas abundantes na superfície terrestre. Os módulos podem ser classificados em três gerações. A primeira geração de células fotovoltaicas é constituída por células de silício cristalino que consistem em uma lâmina de silício na qual é formada uma junção metalúrgica P-N, esta junção é de dois cristais como silício, que possuem uma natureza positiva e negativa. CRESESB (2020) define que nessa geração os módulos podem ser classificados como monocristalinos e policristalinos.

Os módulos com células monocristalinas possuem uma eficiência superior quando comparados aos outros tipos de tecnologias fotovoltaicas existentes. As células policristalinas dependem de um processo de preparação menos rigoroso, sendo produzidas a partir de pedaços de silício criando assim uma célula com várias superfícies, o que resultará em uma ligeira queda da sua eficiência.

De acordo com Villalva e Gazoli (2012), a segunda geração de módulos é composta pelos chamados filmes finos que podem ser constituídos de diferentes materiais, como silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Essa tecnologia consome menos matéria prima e energia em seu processo de fabricação, o que influencia diretamente os seus custos, porém, sua eficiência é relativamente menor do que as tecnologias da primeira geração.

O IEE, Instituto de Eletricistas e Eletrônicos, estabelece que os módulos da terceira geração devem ser altamente eficientes, possuir baixo custo por watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade. Alguns exemplos desta geração são os CPV (concentrator fotovoltaics), os módulos DSSC (Dry-sensitised solar cell), as células orgânicas e as células híbridas. Na Tab. 1 adaptada de Tolmasquim (2016) é possível observar uma comparação entre a eficiência destas diferentes tecnologias.

Tabela 1 - Eficiência entre diferentes tecnologias dos módulos fotovoltaicos

Tecnologia	Eficiência
Silício Cristalino	
Monocristalino	17 a 21,5%
Policristalino	14 a 17%
Filmes Finos	
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%
Telureto de Cádmi (CdTe)	10 a 16,3%
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	12 a 14,7%
Concentrador fotovoltaico (CPV)	27 a 33%

2.2 Composição

IRENA (2016) apresenta que os módulos fotovoltaicos possuem diferentes componentes, os módulos de silício cristalino possuem uma camada de vidro temperado com baixo índice de reflexão para que a máxima passagem de luz seja possível. Após a camada de vidro, o módulo possui o material encapsulante EVA - Ethylene Vinyl Acetat, que irá atuar na proteção contra o envelhecimento decorrentes dos raios UV, extremas temperaturas e umidade.

Os contatos metálicos são empregados para que a transmissão do fluxo de elétrons seja possível. Estes podem ser metais de maior interesse econômico como cobre e prata, tornando a reutilização destes materiais mais atrativa. Segundo Oliveira (2021), sua reutilização pode representar uma significativa economia de energia e gastos, além de reduzir os impactos ambientais causados pela aplicação da tecnologia.

Brower; Gupta; Honda (2011) explicam que a célula é responsável por realizar o processo de transformação da luz do sol em energia elétrica. Esta será alocada entre as camadas de material encapsulante e com os contatos elétricos. O chamado BackSheet será responsável por proteger os componentes internos do módulo e atuar como um isolante elétrico. Adicionalmente o módulo possui uma moldura, geralmente em alumínio, que irá atuar de forma estrutural. É empregado também seladores de silicone ou polibutil entre a moldura e o vidro com o objetivo de isolar estes materiais. A Fig. 4 retirada do IRENA (2016) traz uma representação esquemática da composição dos módulos de silício cristalinos.

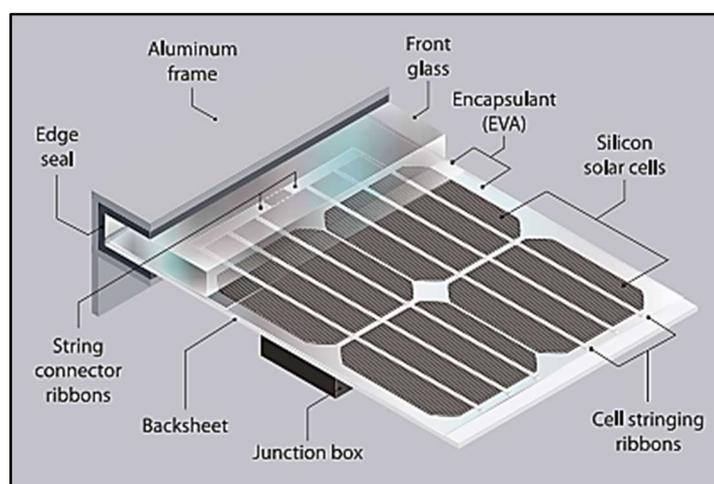


Figura 4 - Componentes de um módulo c-Si

Em demais tecnologias podem ser encontrados outros elementos como Índio, Selênio, Telúrio e Cádmi, elementos de alta toxicidade. A Tab. 2 adaptada dos estudos de Oliveira (2019) demonstra a composição dos módulos fotovoltaicos de primeira e segunda geração.

Tabela 2 - Composição dos módulos fotovoltaicos

Material	1ª Geração	2ª Geração		
	c-Si	a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Vidro	74,16%	90,00%	95,00%	85,00%
Alumínio	10,30%	<1,00%	<1,00%	12,00%
Polímeros	10,15%	10,10%	3,50%	6,00%
Silício	3,00%	<0,10%	0,00%	0,00%
Zinco	0,00%	<0,10%	0,01%	0,12%
Chumbo	0,07%	<0,10%	<0,01%	<0,10%
Cobre	0,57%	0,00%	1,00%	0,85%
Índio	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%
Estanho	0,12%	0,00%	0,00%	0,03%
Telúrio	0,00%	0,00%	0,07%	0,00%
Cádmio	0,00%	0,00%	0,07%	0,00%
Prata	0,01%	0,00%	<0,01%	0,00%
Seladores	1,16%	0,00%	0,00%	0,00%

Para classificar os resíduos produzidos pelo módulo fotovoltaico deve-se identificar os riscos que estes possam vir a causar ao meio ambiente e à saúde humana. Esta identificação auxilia no plano de contenção e na definição dos processos que devem ser tomados para definir as medidas necessárias.

Como pode ser observado no quadro anterior, o vidro representa uma importante parcela da massa do módulo fotovoltaico, juntamente com o polímero e o alumínio, podendo representar em média 90% de sua massa total. No entanto, esses materiais não apresentam uma classificação perigosa, diferindo dos componentes químicos com menor representatividade, como o silício, a prata, estanho e chumbo que juntos representam cerca de 4% da massa total do módulo e apresentam dificuldades para a sua reciclagem.

Para Véronique Monier (2011) uma das principais preocupações com o descarte destes materiais é que o descarte incorreto pode ocasionar a sua lixiviação para os corpos d'água e promover danos à fauna e à flora existente. Deste modo, o principal critério adotado para a classificação destes resíduos é determinar a concentração de certas substâncias em um líquido que será exposto aos fragmentos dos módulos por um certo período de tempo. A concentração permitida pode variar de acordo com a jurisdição aplicada a cada país, além da classificação como resíduo perigoso e não perigoso.

2.3 Métodos para o processo de reciclagem

Segundo IRENA (2016), todos os processos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos seguem o fluxo representado na Fig. 5, sendo que este processo se inicia com a extração da matéria-prima e termina com o seu descarte ou reaproveitamento, podendo aplicar os processos de reciclagem ou recuperação.

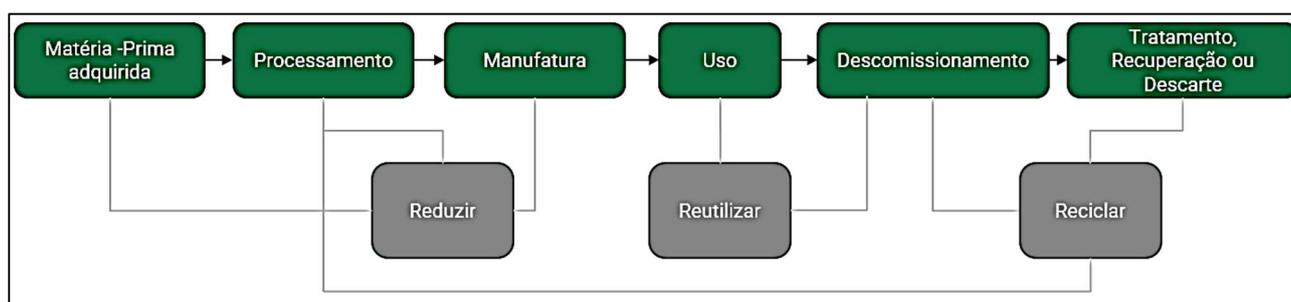


Figura 5 - Diagrama de fluxo do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos e oportunidades para reutilização, redução e reciclagem.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos pode ser considerada dificultosa em função dos seus diferentes componentes que são formados por diversos materiais. Os autores Fthenakis (2000), Latunussa et al. (2016) e Brenner e Abramovic (2017) afirmam que em média 90% dos materiais podem ser inseridos e reaproveitados em outros módulos. Resumidamente, são aplicados três processos distintos, podendo ser físico, químico e térmico.

2.3.1 Processo Físico

Segundo IRENA (2016) este processo consiste no desmonte do equipamento removendo a moldura de alumínio anodizada, as caixas de junção e os cabos. Com exceção da moldura de alumínio, que pode ser reinserida na cadeia

metalurgia secundária, demais materiais podem ser triturados e analisados para determinar o nível de toxicidade. Posteriormente é realizado o seu descarte.

2.3.2 Processo Químico e Térmico

O processo térmico pirólise pode ser utilizado para a separação do vidro do material encapsulante e do backsheet em módulos de silício cristalino. Nos módulos de 1º e 2º geração podem ser aplicados outros processos químicos para a separação do material semiconductor dos eletrodos positivos e negativos, para os módulos de segunda geração a separação do material encapsulante do vidro ocorre através de processo mecânicos e térmicos.

Apesar de existirem diferentes processos desenvolvidos em laboratório para a reciclagem dos módulos, apenas dois processos são aplicados de forma comercial atualmente. Na Fig. 6 adaptada de Bazin, F.; et. al. (2012), é apresentado um fluxograma de dois métodos de reciclagem.

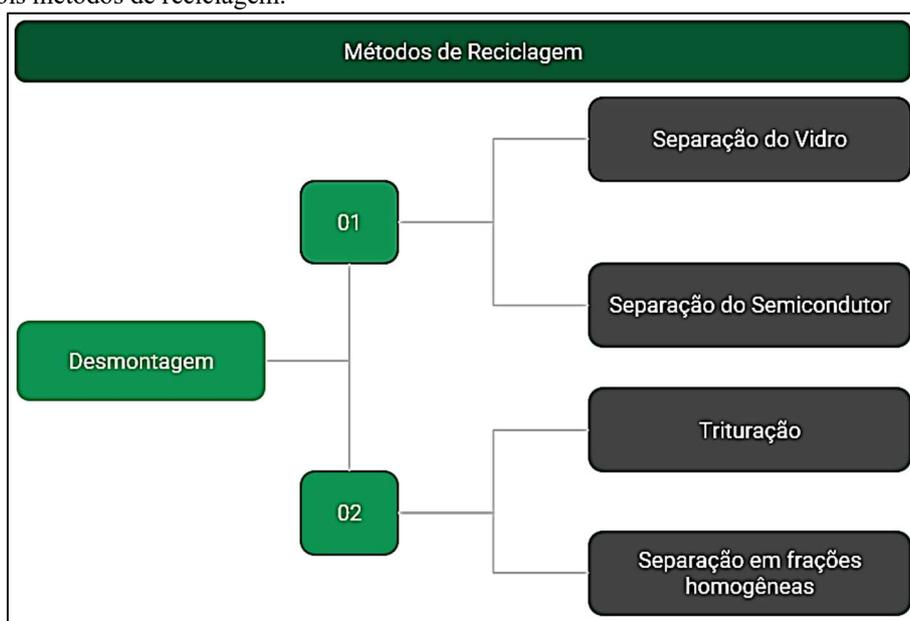


Figura 6 - Métodos de Reciclagem

A separação dos componentes como vidro, moldura de alumínio, cabeamento e polímeros é o primeiro processo para a reciclagem dos módulos de primeira geração. Segundo IRENA (2016), a reciclagem dos vidros é executada em lotes e com custo relativamente baixo de implementação. Esse processo conta com a remoção dos resíduos de polímeros dos vidros e demais componentes. O vidro possivelmente contaminado pode ser misturado a vidros reciclados de outros processos a serem aplicados nas indústrias de isolamento térmico e indústrias de fibra de vidro. Os cabos de cobre e a moldura de alumínio podem ser aplicados na reciclagem de metal, os polímeros recuperados podem ser utilizados em usinas de transformação de resíduos em energia.

Para os módulos de segunda geração, inicia-se com processamento utilizando a combinação de processos mecânicos e químicos. O processo apresentado por Sinha e Cossette (2012), pode recuperar cerca de 90% do vidro e cerca de 95% do material semiconductor desta geração de módulos. Este processo consiste em triturar os módulos em particular de aproximadamente 5 milímetros a fim de ser quebrada a ligação entre as células, e o resíduo é aspirado em um filtro de ar particulado. Na segunda etapa, uma mistura de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio é aplicada para que seja realizado um processo de corrosão sobre a camada semicondutora. O vidro e o material etileno-vinil-acetato são separados e posteriormente enxaguados utilizando água e realizando a secagem em um filtro. O líquido com os metais pode ser submetido a trocadores de íons para separação dos metais extraíndo cádmio e do telúrio, que podem ser aplicados novamente na indústria.

2.4 Regulamentação da reciclagem de módulos fotovoltaicos

A maioria dos países não possuem políticas regulamentadoras específicas para o setor de reciclagem de módulos fotovoltaicos, sendo que nestas regiões os resíduos produzidos são classificados nas políticas gerais de destinação e tratamento. A partir de 2012 a UE classificou os módulos fotovoltaicos como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos na Diretiva Europeia de 2012/19/EU, em que está previsto o recolhimento seletivo a fim de reduzir a eliminação destes componentes de forma não tratada.

Além da obrigatoriedade de ser realizada a eliminação e transporte dos equipamentos recolhidos, desta forma, está proibida a eliminação de equipamentos que não foram sujeitos a tratamentos prévios. A taxa de recolhimento, em que está aplicada o princípio da responsabilidade do produtor que deve ser recolhida é de uma taxa mínima de 45%. Esta é a

taxa calculada de acordo com o peso total dos REEE - Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, recolhidos nos estados-membros. O tratamento adequado deverá ser assegurado pelos estados-membros em todos os REEE recolhidos.

A UE estabelece ainda uma codificação dos resíduos com as características para determiná-los como perigosos e não perigosos para ser realizado o adequado transporte, instalação e possíveis decisões sobre o processo de reciclagem, fornecendo também uma base estatística que pode ser utilizada no controle do material reciclado.

O Brasil não possui legislação específica aplicada ao processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos, porém a PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída em 2010 pela Lei nº 12.305/10 incentiva a logística reversa de REEE e estabelece metas para evitar o descarte destes equipamentos em zonas não adequadas. Segundo a ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas na NBR 10004 os resíduos podem ser classificados em três classes, I - perigoso, IIA - não perigoso e não inerte e IIB - não perigoso e inerte. A norma ainda indica o destino correto e a periculosidade de cada material. Para os resíduos fotovoltaicos são aplicados ensaios de lixiviação regulados pela NBR 10005:2004, para analisar a concentração dos materiais perigosos.

2.5 Cadeia de Valor

De acordo com IRENA (2016) e Oliveira (2019), uma economia circular, baseia-se no princípio dos 3Rs: reduzir, reutilizar e reciclar, sendo aplicável à cadeia de produção dos módulos fotovoltaicos pode ser encaixada. Esse mercado possui alto crescimento, uma escassez de matérias-primas, mas com pressão para a diminuição dos valores pagos na tecnologia, portanto o uso e a substituição de materiais reduzidos se tornam viável e atrativo. As ferramentas de redução e reuso englobam diferentes reparos, a reciclagem fornece o processamento e o tratamento dos módulos e podendo ainda fornecer como produto matérias-primas para a fabricação de novos módulos.

O serviço de coleta, transporte e desmonte destes materiais para os processos de reciclagem geram empregos em diferentes escalas. Os diferentes tamanhos dos sistemas fotovoltaicos possuem divergências nesta aplicação, uma vez que em usinas de médio e grande porte é comum as empresas e proprietários possuírem equipes especializadas para realizarem o monitoramento e manutenção da planta. Porém, em pequenos comércios e residências, este será um serviço que deverá ser prestado possivelmente por empresas terceirizadas, que encaminham estes materiais para empresas recicladoras ou para aterros sanitários dependendo da regulamentação vigente e da existência de empresas especializadas para o tratamento. Em zonas rurais e remotas este serviço poderá representar um alto ganho à empresa responsável, uma vez que a dificuldade ao acesso a estas regiões encarecerá os serviços prestados. A especialização das empresas que desejam realizar este serviço será um ponto de atenção, pois apesar do módulo ter sofrido avarias ou estar no fim da sua vida útil, novos danos ao equipamento deverão ser evitados para que o seu aproveitamento seja satisfatório.

Atualmente no Brasil não existem plantas dedicadas para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, não havendo quantidade suficiente para justificar a abertura de uma planta dedicada ou incentivos econômicos. Dessa forma, a principal forma de reaproveitamento é a separação mecânica dos compostos. Futuramente o surgimento de plantas dedicadas pode significar o aumento da capacidade de maximizar receitas em resposta a melhores componentes nas saídas dos processos e melhoria nos processos de recuperação dos constituintes de maior valor. Segundo IRENA (2016), alguns dos principais pontos para projetar futuros sistemas de reciclagem são:

- Evitar danos no transporte e nos processos de desmonte dos módulos fotovoltaicos;
- Realizar processos para o aproveitamento de materiais valiosos e perigosos;
- Utilizar rotulagem para identificação dos produtos.

Os materiais recuperados podem ser inseridos em novas cadeias de valor, como pode ser verificado na Tab. 3 adaptada do estudo de Bazin, F.; Billard, Y.; Lacroix, O., 2012.

Tabela 3 - Possibilidade da Reinserção dos componentes

Componente	Possibilidades da Reinserção
Vidro	Aplicação nas indústrias de vidro, lâ de vidro e construção e em novos módulos fotovoltaicos.
EVA	Aplicação na indústria química e na recuperação de energia de incineração.
Semicondutor da primeira geração	Aplicação em novos wafers e na indústria fotovoltaica como semicondutor e como agregados para forno de fundição metalúrgica.
Semicondutor da segunda geração	Aplicados a novas células ou sua reutilização.
Metais com alto valor e Alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original.

2.6 Cadeia de Reciclagem no Brasil

Com a crescente no mercado fotovoltaico faz-se necessário que medidas de reciclagem dos equipamentos utilizados nesta tecnologia sejam aplicadas. A reciclagem dos materiais não ocorre somente ao fim da vida útil dos equipamentos,

mas também, quando os equipamentos sofrem algum dano durante o processo de transporte, instalação e manutenção. Existem no mercado brasileiro empresas que oferecem a reciclagem dos módulos fotovoltaicos como seu principal serviço, estas empresas possuem parcerias com os integradores, responsáveis pelas instalações e os distribuidores que fornecem os equipamentos.

O processo de reciclagem passa inicialmente por um processo de inspeção visual, em que ocorre uma avaliação do material coletado e dos processos que serão necessários para a sua reciclagem. Após este processo de triagem, é retirado o quadro de alumínio, seus conectores e a caixa de junção. Posteriormente é retirado o vidro, o restante dos materiais é incinerado e tratado quimicamente para separação dos metais. Ao final dos processos, os materiais restantes são encaminhados às empresas de reciclagem que adquirem estes materiais. A Fig. 7 exemplifica um dos processos de reciclagem utilizados por uma empresa atuante no setor.

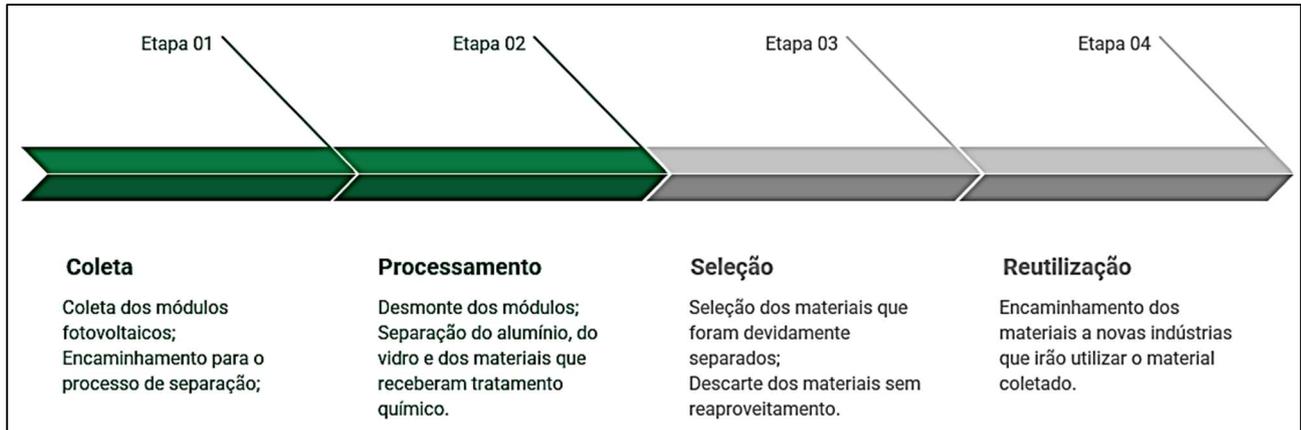


Figura 7 - Processo de Reciclagem

Este processo de reciclagem contribui com uma economia circular, uma vez que estas empresas que adquirem estes materiais provenientes do módulo fotovoltaico, aplicam estes insumos em outros processos industriais aos quais prestam serviços.

Segundo a empresa SunR, que atua no setor de reciclagem dos módulos fotovoltaicos, os processos utilizados são realizados por separações físicas e mecânicas, em que é possível a reinserção de alguns componentes no processo produtivo, como o alumínio, cobre, vidro com diferentes granulometrias, silício, prata e outros metais, que irão depender da tecnologia dos módulos reciclados. Alguns materiais são mais acessíveis de serem encaminhados para reciclagem e reuso, como o alumínio e o cobre. Isso acontece, principalmente, pela facilidade de extração, quantidade e a absorção desses materiais no mercado.

Atualmente não existem regulamentações específicas para o processo de reciclagem em si. Isso porque não ocorre a emissão de componentes químicos no processo. Os módulos fotovoltaicos enquadram-se na política nacional de resíduos sólidos, lei nº 12.305/10 que prevê a redução na geração de resíduos, através de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos decorrentes do manejo adequado dos resíduos, bem como sua reutilização (Verdum, 2019).

3. CONCLUSÃO

O crescimento da aplicação da energia fotovoltaica possibilita a criação de novas cadeias de valor ao longo de todo processo produtivo e após a vida útil dos componentes desta tecnologia. Os objetos deste estudo foram os módulos fotovoltaicos que possuem uma projeção de acúmulo de resíduos de até 8 milhões de toneladas até 2030. Estima-se que poderá ser recuperado desses resíduos matéria-prima para produzir 60 milhões de novos módulos.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos estimula a geração de novas indústrias, incentivando um crescimento em novas cadeias de valor alinhadas às mudanças globais para um desenvolvimento sustentável a longo prazo. Implica na criação de novos empregos no setor público e privado, além de institutos de pesquisa e desenvolvimento.

O Brasil possui grande potencial para a implementação da tecnologia de reciclagem, grande parte em função da sua localização geográfica, no entanto o país possui déficit de legislações vigentes que possam incentivar e propagar boas práticas para que, ao término do ciclo de vida dos módulos, a sua reinserção em novas cadeias seja possível e seja realizada de forma adequada.

O país pode utilizar políticas públicas já consolidadas como a da UE, que realiza e propõe controle por parte dos próprios fabricantes que fornecem em seu território sobre estes módulos desativados e/ou avariados. O sucesso de um sistema de reciclagem bem estruturado que resultará em novas cadeias de valor dependerá de uma correta manipulação pelas partes envolvidas no processo, estipulando com clareza as responsabilidades dos clientes, fornecedores e fabricantes de geração de energia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. [S. l.: s. n.,2020. Anual. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. [S. l.: s. n.,2021. Anual. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2021.
- BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O. Recycling of Photovoltaic End-of-Life Panels – International Overview. RECORD. Acesso em: 23 jul. 2021.
- BRENNER, W.; ADAMOVIĆ, N.A Circular Economy for Photovoltaic Waste – the Vision of the European Project CABRISS.2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2017, pp. 146-151. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973407. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7973407&isnumber=7973374>
- BROUWER, Karen Ann; GUPTA, Chaya; HONDA, Shelton. Methods and Concerns for Disposal of Photovoltaic Solar Panels. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Science In Engineering, The Faculty Of The Department Of General Engineering, San Jose State University, San Jose, 2011. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.5648&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- BNDES SETORIAL, B. BNDES Setorial, n. 40, set. 2014. , 2014
- CRESESB CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. Potencial Solar, 2020.
- DIRETIVA 2012/19/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, 2012. Disponível em: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=en> . Acesso em 27 jul. 2021.
- FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. Energia solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotérmica e fotovoltaica.: Ed universitária da UFPE. Recife, 1995.
- FTHENAKIS, V. (2000), “End-of-Life Management and Recycling of PV Modules,” Energy Policy, Vol. 28, pp. 1051-1058, Elsevier, Amsterdam.
- IEA-PVPS (2014), Review of Failures of Photovoltaic Modules, International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems. Disponível em: www.iea-pvps.org. Acesso em 27 jul. 2021.
- IRENA. END-OF-LIFE MANAGEMENT: Solar Photovoltaic Panels, 2016. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.
- LATUNUSSA, C., ARDENTE, F., BLENGINI, G.A., MANCINI, L. Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels. Solar Energy Materials & Solar Cells 156 (2016) 101–111.
- OLIVEIRA, Daniel Rodrigues. Proposição de Abordagem para Avaliação de circularidade através de ferramentas de economia circular e da metodologia ACV: Estudo aplicado em um painel solar fotovoltaico de silício cristalino. 2019. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Paraná, [S. l.], 2019. f. 156. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/65739/R%20-%20D%20-%20DANIEL%20RODRIGUES%20DE%20OLIVEIRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 6 jul. 2021.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. 530 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 15 ago. 2021.
- SINHA, P. and M. Cossette (2012), “End-of-Life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining,” 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt am Main.
- TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 2016.
- VÉRONIQUE MONIER. European Commission. Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive. Paris, 2011.

VALUE CHAIN IN THE RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *With the increase of photovoltaics around the world, the global installed capacity is expected to reach 4,500GW in 2050. This market has grown significantly over the years and the volume of photovoltaic modules, a component used to convert solar energy into electrical energy, has also increased. Therefore, the increase in waste generated at the end of the useful life of these systems represents an environmental challenge for the application of new public policies, in addition to generating new opportunities with the reinsertion of these materials that can be recycled into a new value chain. The potential available for the photovoltaic waste market until 2030 represents about 8 tons of raw materials that can be inserted and used in the manufacturing of 60 million new modules, but only the European Union has specific regulations applied to photovoltaic waste. The different components can be used in new industries, such as the glass, metal, and even photovoltaic. With this great potential, there are challenges in countries that do not have specific public policies despite having great potential such as Brazil, which has great potential for implementing this kind of technology due to its privileged location. The country can use already consolidated public policies such as that of the EU, which carries out and proposes the control by manufacturers that supply in its territory over these deactivated and/or damaged*

modules. The success of a well-structured recycling system that will result in new value chains will depend on correct handling by the parties involved in the process, who must have their responsibilities as customers, suppliers and manufacturers defined and stipulated by current regulations. This study aims to present opportunities in the value chain of recycling photovoltaic modules, as well as demonstrate existing policies and perform a critical and comparative analysis.

Key words: *Solar Energy, Recycling, Value Chain*