



Artigo

Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil

Antonio Gabriel Fernandes Maia ^[1], Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; maia gabrielmaia@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 14/03/2022;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: Dentre as tecnologias existentes na produção dos módulos fotovoltaicos, existe o predomínio dos módulos de silício mono e policristalinos (c-Si). Estes possuem vida útil limitada em aproximadamente 25 anos, em condições normais. Por possuir metais pesados em sua composição, o descarte inadequado pode causar danos ao meio ambiente. Dentre as formas de descarte dos resíduos dos módulos c-Si, a reciclagem se destaca por permitir a recuperação de parte dos materiais, que não são renováveis, e reutilizá-los. A produção de certos materiais com o uso da reciclagem possibilita redução no consumo de energia elétrica, em comparação com a utilização de matéria prima. Diante disso, o presente trabalho visa estimar o potencial de energia elétrica conservável a partir da reciclagem dos módulos FV c-Si. Além disso é estimado o quanto de energia pode ser evitada com a reciclagem de módulos descartados no Brasil. Os resultados se mostraram satisfatórios e estima-se que cada módulo FV c-Si reciclado pode-se conservar algo em torno de 43 kWh.

Palavras-chave: conservação energética, módulo fotovoltaico de silício cristalino, aproveitamento energético, reciclagem

Abstract: Among the existing technologies in the production of photovoltaic modules, there is a predominance of mono and polycrystalline silicon modules (c-Si). These have a limited lifespan of approximately 25 years under normal conditions. Because it has heavy metals in its composition, improper disposal can cause damage to the environment. Among the ways of disposing of waste from c-Si modules, recycling stands out for allowing the recovery of part of the materials, which are not renewable, and their reuse. The production of certain materials with the use of recycling allows a reduction in the consumption of electric energy, in comparison with the use of raw materials. Therefore, the present work aims to estimate the potential of conserveable electrical energy from the recycling of PV c-Si modules. In addition, it is estimated how much energy can be avoided with the recycling of discarded modules in Brazil. The results were satisfactory and it is estimated that each recycled c-Si PV module can conserve something around 43 kWh.

Key-words: energy conservation, crystalline silicon photovoltaic module, energy use, recycling

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte alternativa renovável de energia que vem se destacando no mundo nos últimos anos, e uma das formas de se utilizar da referida fonte de energia é através dos Sistemas Solares Fotovoltaicos (SFV). Através de tais sistemas é possível produzir energia sem o uso de combustíveis fósseis ou emissão de gases de efeito estufa [1].

Em razão da alta insolação incidente no Brasil que propicia um grande potencial energético, a capacidade instalada de SFV aumenta exponencialmente a cada ano, e as tecnologias existentes utilizadas neste tipo de geração possui predominância de módulos de silício mono e policristalino, com um total de participação 94,5% na produção global FV [2]. Embora possuam muitas vantagens, os módulos fotovoltaicos c-Si tem vida útil limitada. Após 25 anos de geração, os módulos apresentam redução média de 20% em sua geração. No entanto, o desgaste pode ser maior devido às condições ambientais e climáticas em que os módulos estão submetidos.

Considerando que o descarte dos módulos FV ocorrem na mesma proporção das instalações, torna-se importante estudar sobre a destinação dos módulos FV fora de uso, pois torna-se uma preocupação ambiental e energética quanto à sua destinação e reaproveitamento.

Dentre os materiais presentes nos módulos, os metais causam maior impacto ambiental em caso de descarte inadequado. O descarte indevido dos módulos FV pode ocasionar lixiviação para corpos d'água e promover a morte da fauna e flora por toxicidade [3].

Diante das alternativas de descarte de módulos FV, a reciclagem de módulos FV permite recuperar parte dos materiais, que não são renováveis, e reutilizá-los. A produção de certos materiais com o uso da reciclagem possibilita a redução no consumo de energia elétrica, em comparação com a utilização de matéria-prima [4]. No caso, os que possuem maior potencial energético são alumínio, cobre, aço, polímeros, entre outros [5].

Por todo o exposto, faz-se necessário, portanto, buscar alternativas de aproveitamento do potencial energético dos resíduos dos módulos fotovoltaicos inutilizáveis bem como analisar se é viável tal reaproveitamento. Para análise da viabilidade, é fundamental quantificar a energia aproveitada no processo como um todo. Logo, o presente trabalho tem como objetivo principal estimar o potencial de conservação de energia a partir da reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino. E, a partir desse valor, quantificar o potencial de conservação com base na projeção de descartes dos módulos no Brasil.

2. DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Esta seção trata sobre conceito, funcionamento, composição e panorama atual dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si). Por fim, é abordado questões sobre a vida útil dos módulos FV e estratégias de reaproveitamento dos resíduos fotovoltaicos com enfoque na reciclagem.

2.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos capazes de converter a energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. A geração ocorre sem emissão de gases do efeito estufa, podem ser constituídos de diferentes tamanhos e potências e, normalmente, necessitam de pouca manutenção [5]. Os módulos são compostos por células fotovoltaicas agrupadas em uma estrutura a fim de se obter os parâmetros mais adequados à aplicação do módulo projetado. Tais células fotovoltaicas operam com a tensão de 0,6 V aproximadamente. É comum a utilização de um arranjo de módulos fotovoltaicos para maior geração de energia elétrica, este conjunto é chamado de painel fotovoltaico [5].

A geração de corrente elétrica ocorre por meio do efeito fotovoltaico, onde, de forma simplificada, os fótons incidentes na célula fotovoltaica provocam o movimento de elétrons entre as camadas P-N do semicondutor de silício e, conseqüentemente, no circuito no qual está conectado.

Segundo [5], os módulos fotovoltaicos podem ser classificados em três gerações. A primeira geração é formada por módulos de silício cristalino (c-Si), com estrutura monocristalina ou policristalina. Estas são derivadas do mesmo material, porém, se diferem no princípio de produção e eficiência. A primeira possui eficiência média de 15 a 22% enquanto os policristalinos, que são formados por vários cristais, possuem eficiência média entre 14 e 20%. [7].

Módulos da segunda geração são compostos por filmes finos (*thin film*), produzidos por diferentes materiais, como silício amorfo (*a-Si*), cádmio-telúrio ou CIGS (cobre, índio, gálio, selênio). A terceira geração é formada por tecnologias emergentes, tais como CPV (*concentrator photovoltaics*) que utilizam lentes para concentrar a luz do sol; módulos DSSC (*dry-sensitised solar cell*) que são células solares sensibilizadas por corantes; células orgânicas e células híbridas.

A tecnologia de silício cristalino se destaca por ter maior potencial energético [5]. A Figura 1 mostra a grande predominância do silício no mercado, com um total de participação 94,5% na produção global FV [2].

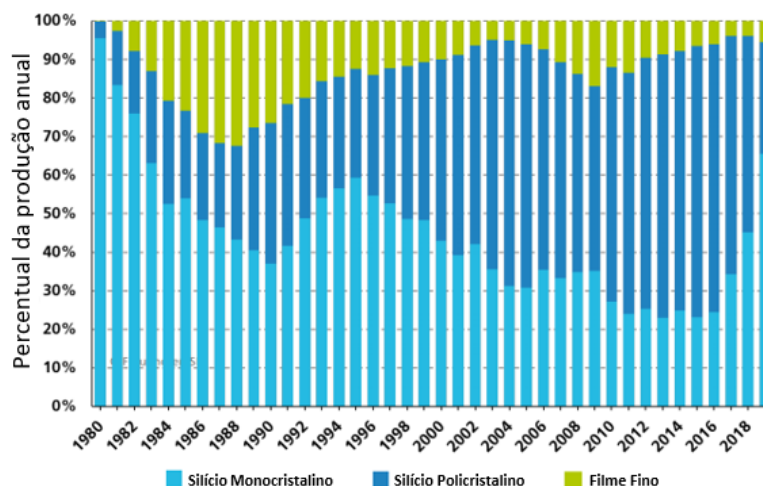


FIGURA 1. Produção anual mundial fotovoltaica por tecnologia.
Fonte: [2]

Em meio a variedade de tecnologias de módulos fotovoltaicos, o presente trabalho limita-se ao estudo do módulo FV de silício monocristalino e policristalino, pelos motivos mostrados na Figura 1, ou seja, por se tratar de uma tecnologia bastante empregada no mundo.

2.2 Módulos de Silício Cristalino

Antes de conhecer o processo de reciclagem, é necessário entender a estrutura e a composição dos módulos FV, que será explorado neste tópico. Por existir diversos fabricantes de módulos no mundo e rápidas mudanças nas tecnologias, sua construção pode variar bastante. Portanto, neste tópico, é apresentada a composição de forma geral. Na camada da célula fotovoltaica, além do silício, emprega-se diferentes contatos metálicos, que podem conter cobre e prata, para a transmissão de fluxo de elétrons. Conforme [5], a reutilização destes compostos pode significar grande economia de energia, corte de gastos e redução nos impactos ambientais, devido ao processo de extração e produção desses metais.

As células, após interligadas eletricamente, são encapsuladas a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico. Segundo [8], o encapsulamento é formado por camadas, chamado de *wafers*, onde o mesmo é composto por vidro temperado de alta transparência, acetato de etil vinila (EVA) estabilizado para a radiação ultravioleta, células fotovoltaicas, EVA estabilizado e um filme posterior isolante (*backsheet*), nesta ordem.

O EVA é uma resina polimérica transparente com a principal função de proteger as delicadas regiões da célula contra umidade, sujeira e outras condições esperadas na operação dos módulos, além de unir o vidro e o silício [9]. É desejável que o material encapsulante possua alta transparência ótica sobre o espectro solar, boa adesão e proteção contra umidade. Deste modo, o encapsulamento é fundamental para a durabilidade e manutenção do desempenho ao longo da vida útil do módulo [10]. Apesar do encapsulamento de EVA ser utilizado em mais de 85% dos módulos FV atualmente, é esperado um aumento de até 30% da participação de mercado para encapsulamento de Poliolefina [11].

O *backsheet* é a camada mais inferior do módulo, além de isolante elétrico, protege o módulo contra radiação UV, umidade, e entrada de poeira e gases [9] [4]. É normalmente composto de polímeros tais como fluoreto de polivinila (PVF ou *Tedlar*®), tereftalato de polietileno (PET), dentre outros [8]. É, então, aplicada uma moldura externa, normalmente composta de alumínio, que oferece resistência e leveza a estrutura do módulo. A selagem do vidro e a moldura de alumínio são usualmente empregados seladores de silicone ou polibutil para proteção das células contra água e partículas. No verso do módulo encontra-se a caixa de junção com as conexões elétricas de todas as células [4]. A Figura 2 ilustra as camadas de materiais de um módulo fotovoltaico cristalino.

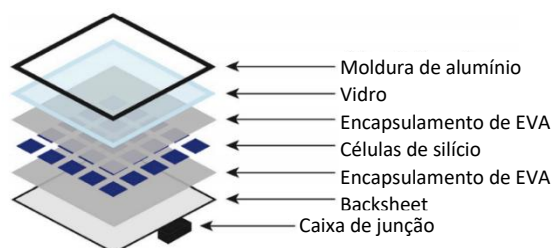


FIGURA 2. Diagrama das camadas de um módulo fotovoltaico cristalino [12]

Em média, um módulo FV c-Si tem densidade de $13,7 \text{ kg/m}^2$. Em termo da massa dos materiais do módulo FV de c-Si, o vidro tem a maior percentagem (68%), seguido da moldura de liga de alumínio (17%) [9]. A 0 ilustra a composição média das camadas de um módulo FV de c-Si.

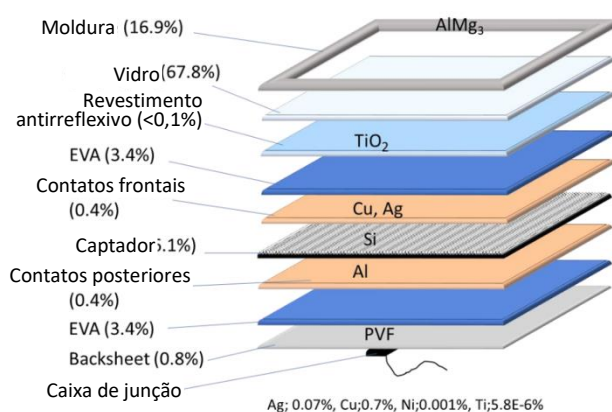


FIGURA 3. Estrutura comum de um módulo FV c-Si e composição média [9]

Conforme [13], existe uma tendência da indústria em produzir wafers mais finos e flexíveis, bem como estruturas de células mais complexas. Pesquisas em eficiência e economia dos materiais levarão a uma redução na quantidade de materiais por módulo e, conseqüentemente, menos materiais danosos ao ambiente. A Figura 4 compara a quantidade relativa de materiais presente nos módulos FV de silício cristalino em 2014 com uma estimativa para 2030. Observa-se que é previsto um aumento na utilização de vidro no módulo fotovoltaico na ordem de 4%, enquanto reduz-se o uso de silício em pouco mais de 2%, alumínio em 1% e outros metais em 0,01% [13].

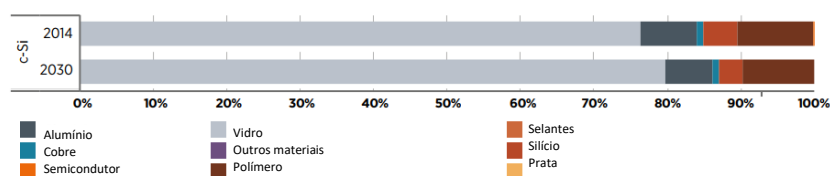


FIGURA 4. Tendência de evolução dos materiais em percentagem de massa total dos módulos FV c-Si.

Fonte: Adaptado de [13].

2.3 Vida Útil dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos de c-Si instalados, em condições normais, se degradam numa razão entre 0,5% e 1,0% ao ano [8]. Assim, após 25 anos de operação, os módulos fotovoltaicos apresentam redução de aproximadamente 20% da sua potência nominal. Geralmente os fabricantes de módulos FV de c-Si dão garantia contra defeitos de fabricação de 3 a 5 anos e garantia de rendimento mínimo durante 25 anos [8]. No entanto, o desgaste pode ser maior devido às condições ambientais e climáticas em que os módulos estão submetidos.

De acordo com [14], a temperatura, umidade, irradiação e impactos mecânicos são alguns dos principais fatores que podem degradar a performance do módulo FV. Estes fatores podem induzir degradações no módulo como corrosão, descoloração, delaminação, rachaduras e rompimento de conexões.

A umidade que entra no módulo pode provocar corrosão nas partes metálicas e na caixa de junção, causando perda de performance. Além disso, pode degradar a aderência entre a célula e a moldura metálica [14]. A degradação por delaminação é caracterizado pela perda de aderência entre a camada da célula e o encapsulamento ou com vidro superior do módulo. Este é mais frequente em climas quentes e úmidos provocando, assim, o aumento da reflexão da luz e a entrada de umidade no módulo [14].

A descoloração nos módulos é caracterizada pela mudança na cor do material, que se torna amarelado ou marrom. A causa é correlacionada com a exposição à radiação UV, resultando na degradação do encapsulamento EVA ou no material adesivo entre o vidro e as células FV, reduzindo assim a potência de geração devido a modificação da transmissividade da luz que chega as células do módulo [14].

Ainda em [14], é afirmado que rachaduras ou quebras no vidro ocorrem geralmente durante a instalação, manutenção ou transporte. Os módulos podem funcionar normalmente, porém o risco de choques elétricos e entrada de umidade aumentam.

Outros fatores de degradações dos módulos FV também são citados nas literaturas estudadas, tais como degradação induzida pelo potencial, pontos quentes e bolhas. A 05 mostra a representatividade das principais formas de degradações.

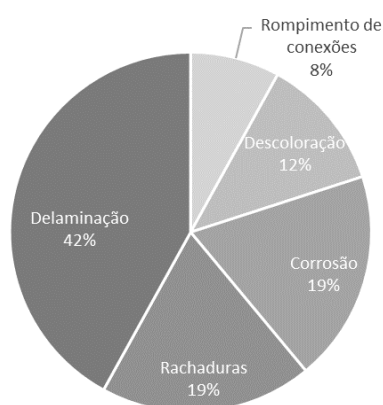


FIGURA 5. Principais tipos de degradação nos módulos fotovoltaicos.
Fonte: Adaptado de [14].

De acordo com [13], estudos estatísticos observaram que 40% dos módulos FV inspecionados possuem pelo menos uma célula com micro rachaduras. As falhas podem ser divididas em 3 fases dos módulos, que são, as falhas prematuras, as falhas meia-idade e as falhas de esgotamento. A Figura 6 fornece uma visão geral a respeito das principais causas de falhas observadas nos módulos fotovoltaicos.

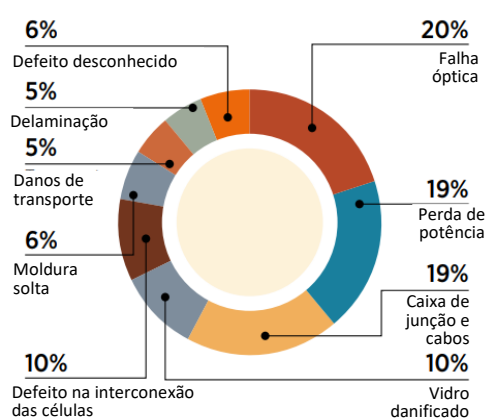


FIGURA 6. Taxas de falha de acordo com reclamações de clientes.
Fonte: Adaptado de [13].

Dentre as principais causas das falhas prematuras, nos primeiros 4 anos de operação dos módulos FV, destaca-se a degradação induzida por luz (*light-induced degradation*), erros no planejamento ou instalação e defeitos na parte elétrica [13]. Causas de falhas de meia-idade, entre 5 e 11 anos de operação, estão relacionados a degradação da camada antirreflexiva do vidro, descoloração do EVA, delaminação e isolamento das células

rachadas [13]. [13] informa que também é comum, nos primeiros 12 anos de operação, depois de muitas exposições ao ambiente, ocorrer falhas de degradação induzida pelo potencial, falhas na caixa de junção, vidro quebrado, moldura solta e defeitos no diodo e nos contatos das células.

No final da vida útil dos módulos são observadas falhas de esgotamento, os defeitos encontrados na meia-idade dos módulos acontecem de forma mais acentuada além de severas corrosões das células e suas conexões [13].

2.4 Reaproveitamento dos Módulos Fotovoltaicos

A principal vantagem da energia solar FV é ser limpa e renovável, logo, é interessante que o descarte dos resíduos seja realizado de forma adequada. Deve-se então minimizar os impactos ambientais da produção deste dispositivo no fim da sua vida útil. Cabe destacar que as células fotovoltaicas contêm metais pesados prejudiciais ao meio ambiente, logo não podem simplesmente ser descartados em aterros [15].

No fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos, pode-se utilizar estratégias de gestão de resíduo do princípio dos 4R's: redução, reuso, reciclagem e recuperação [15]. A redução é a estratégia que de ser preferida dentre as outras citadas. Esta consiste na diminuição do uso de materiais na fase de produção. Os módulos FV possuem elementos perigosos ao ambiente em sua composição, tais como chumbo e outros metais pesados, com alto potencial de acumulação no meio ambiente. Além disso, o uso de metais raros, tais como a prata, que existe em pequena quantidade nos módulos, contribuem para a escassez do recurso. Para isso, portanto, torna-se necessário investimento em pesquisa para substituição de materiais usados na produção do módulo [15].

O reuso envolve a recuperação de sistemas, por meio de retrofit e remodelagem, ou de parte dos componentes dos módulos no fim da vida útil ou por falhas prematuras. Assim, como já existe em alguns países, onde é realizada a comercialização de sistemas FV usados recuperados ou reparados [15]. Normalmente, reparos em módulos envolvem a troca da moldura, nova caixa de junção, troca de diodos, trocas de conectores, substituição de células, entre outros [13].

Para os módulos que não podem ser reparados ou reutilizados, é preferível o tratamento e reciclagem dos resíduos. Diversas tecnologias de reciclagem de módulos são encontradas na literatura, algumas já são utilizadas comercialmente. Grande parte dos materiais, assim, seriam recuperados, reduzindo grande parte do impacto ambiental da fase de produção [15].

A estratégia menos preferível dentre as citadas é a recuperação da energia por meio do processo de interação. No qual, o calor gerado pela combustão dos resíduos não perigosos, pode ser utilizado para a geração de energia elétrica [15]. Uma boa gestão dos resíduos dos módulos FV oferece uma solução sustentável para seu ciclo de vida. Para tanto é necessário analisar a viabilidade técnica, econômica e ambientais da estratégia a ser adotada [15].

Apesar de não possuir lei específica no Brasil para descarte de módulos FV, este é enquadrado como Resíduo De Equipamentos Elétrico-Eletrônicos (REEE). Deste modo, se enquadra na Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12.305/2010, onde, é regulamentado o tratamento adequado para resíduo sólido em geral, e no Art. 33, é instituído a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes que deverão estruturar e implementar um sistema de logística reversa para retorno dos produtos e embalagens após o uso pelo consumidor. No entanto a fiscalização para REEE ainda é falha e o processo de logística reversa ainda não é objeto de controle e fiscalização [15]. Além disso, a falta de conhecimento da população às alternativas de descarte de resíduo tem grande influência, pois este tem papel fundamental para sucesso das ações de logística reversa [1].

Na União Europeia (EU), existe diretiva sobre descarte do lixo eletrônico, onde os módulos FV estão expressos no escopo desta com responsabilidade estendida ao fabricante. A diretiva entrou em vigor em 2014 e todos os países membros da EU devem ter lei que regulamenta a coleta, transporte e tratamento dos módulos FV no fim da vida. Deste modo, o fabricante será responsável pelo fim da vida dos módulos e de custear coleta e reciclagem dentro do mercado europeu [15]. A Alemanha e Reino Unido também possuem regulamentação para tratamento de resíduos dos módulos FV baseados na diretiva da EU. Acredita-se que a chave para o desenvolvimento de uma indústria FV sustentável pode estar na regulamentação e processos para reciclagem e reuso na fabricação [15].

2.5 Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos

Este tópico apresenta uma revisão bibliográfica de alguns métodos de processos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos c-Si encontrados em artigos mais recentes. Observou-se que cada literatura consultada trata a reciclagem dos módulos FV de forma diferente, onde é priorizado a recuperação de determinados materiais em cada, ou também se prioriza o impacto ambiental do processo de reciclagem. *Wafers* reciclados devem ter desempenho próximo ao módulo convencional. Estudos mostraram que *wafers* reciclados possuem características elétricas próximas aos *wafers* padrões, em densidade de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, fator de enchimento e eficiência elétrica [12].

No trabalho desenvolvido por [9] são compiladas técnicas de reciclagem de módulos de diversos autores, com foco na recuperação de vidro, alumínio e silício. De forma geral, os processos utilizados na recuperação dos elementos dos módulos c-Si se resumem em métodos mecânicos, químicos e térmicos e se dividem em três etapas: remoção da moldura, delaminação e separação dos materiais. A reciclagem dos módulos de c-Si inicia-se com a remoção da borda de alumínio e da caixa de junção, frequentemente de forma manual devido aos diferentes modelos de módulos [9]. O próximo passo é a delaminação, onde o vidro e a camada de EVA são separados da célula de silício. Esta etapa é reportada como a etapa mais difícil de reciclagem dos módulos [12]. No trabalho desenvolvido por [9] encontra-se processos químicos e térmicos distintos para obtenção de diferentes saídas neste processo.

Após a delaminação, os componentes vão para o estágio de separação dos materiais pelo método da gravura química (*chemical etching*) para ajudar a separar o vidro das células de silício e os componentes metálicos. Segundo [9], os processos conseguem recuperar mais de 90% dos materiais fotovoltaicos.

Em [12] afirma que um método de separação e recuperação do vidro, da célula e do *backsheet* de módulos c-Si pode ser realizado através de um fio aquecido em aproximadamente 200°C, quando o EVA começa a derreter. No entanto este método deixa resíduos de EVA no vidro e na célula fotovoltaica. O passo seguinte, seria, então, utilizar pirólise ou tratamento químico para retirar o EVA restante. Similarmente, outro método utiliza uma espécie “faca quente” para fatar as camadas do módulo. [12] admite que a recuperação de células intactas é extremamente difícil, pois a utilização de certos processos químicos na recuperação do silício provoca rachaduras devido a inchaço. Uma inovação recente foi a inclusão de dispositivos de pressão ou fixação mecânica para suprimir o inchaço nos processos químicos de reciclagem.

Outro método citado em [12] para delaminação do módulo é a pirólise. Este processo envolve o aquecimento do módulo controladamente, para prevenir estresse térmico, em um ambiente inerte (tais como nitrogênio ou argônio). Este processo tem a vantagem de não oxidar quimicamente o módulo, ajudando na delaminação e na recuperação dos componentes, tais como as células, contatos metálicos e vidro. Além disso, a pirólise permite a utilização dos resíduos dos polímeros como fonte combustível pela queima destes. Processos térmicos permitem, portanto, uma separação rápida, simples e econômica dos módulos [12].

Quando a qualidade do produto reciclado não é suficiente para o produto original, pode-se utilizar o material em outros perfis de indústrias. Portanto, o material recuperado na reciclagem, além de servir para a produção de novos módulos FV, pode ser vendido em commodities, aumentando assim o suprimento da matéria prima no mercado.

No mundo, empresas já realizam reciclagem de módulos FV c-Si em larga escala. Deutsche Solar atua na Alemanha desde 2003 e recupera materiais como plástico, células, vidros, metais ou ligas metálicas de módulos FV c-Si [7]. A empresa italiana SASIL S.p.A. criou uma planta piloto para reciclagem de módulos c-Si, denominada FRELPA, com capacidade de 1 t/h e 8000 t/ano [3]. O órgão PV CYCLE, situado na Bélgica, oferece soluções de larga escala para coleta e gerenciamento de resíduos FV na Europa. Este também possui o projeto de reciclagem Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (FRELPA) com foco na redução de gastos energéticos na reciclagem de módulos e um projeto de uma unidade móvel de reciclagem Photovoltaic Mobile Recycling Device (PV MOREDE) [3].

No Brasil, a empresa SUNR, localizada em Florianópolis/SC, é a primeira empresa da América Latina a atuar no setor de reciclagem FV. A empresa recebe módulos danificados através de coleta e logística reversa, solicitado por qualquer pessoa física ou empresa, de todo Brasil, independente do dano [16]. Na planta de reciclagem da SUNR, os módulos são desmontados manualmente, retirando o alumínio, o vidro e os conectores e, o restante dos materiais, são tratados quimicamente para extração de prata, cobre e silício. Os metais e vidro são vendidos, os polímeros são incinerados gerando energia para alimentar a produção da fábrica e o restante é devidamente descartado. A empresa afirma que seu processo tem eficiência média de 90% de reaproveitamento [16].

3. METODOLOGIA

A presente seção descreve os dados obtidos por meio de pesquisa bibliográfica visando o desenvolvimento desse trabalho. Para isto, inicialmente é estimada a quantidade dos módulos FV descartados no Mundo e no Brasil especificando a estimativa de módulos FV de silício descartados no Brasil. Tais informações auxiliarão

no processo de determinação da quantidade de energia conservada por meio da reciclagem dos módulos FV de silício, objetivo deste trabalho.

3.1 Estimativa de Descarte dos Módulos Fotovoltaicos

A potência instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo atingiu 603 GW em 2019 [17] e é estimado que alcance 4500 GW instalados em 2050 [13]. Na medida que se aumenta o número instalações de sistemas de geração FV, o mesmo acontecerá com o número de módulos desativados após inutilização.

Assumindo a vida útil de 30 anos de utilização dos módulos, estima-se que até 2050 serão acumulados um total de 60 milhões de toneladas de resíduos no mundo através do descarte regular. No entanto, se levar em consideração descartes antecipados, que considera falhas antes dos 30 anos de operação, seriam 78 milhões de toneladas de resíduos acumulados até 2050. O valor deste material após recuperação pode exceder o total de US\$ 15 bilhões de matéria prima, equivalente a 2 bilhões de módulos fotovoltaicos, ou 630 GW [13]. A Figura 7 mostra a estimativa da massa de resíduos acumulados dos módulos fotovoltaicos no fim da vida útil para cenário regular e considerando os descartes antecipados com a capacidade FV instalada.

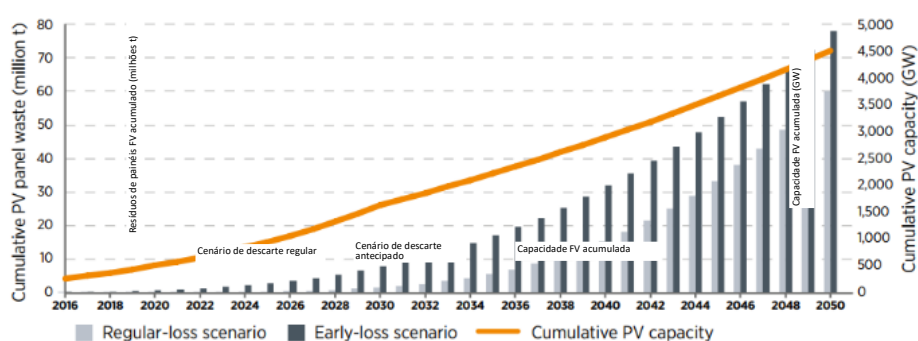


FIGURA 7. Massa de resíduos global estimados acumulados de módulos FV descartados.

Fonte: Adaptado de [13].

Segundo [13], no Brasil, considerando o descarte regular dos módulos fotovoltaicos, espera-se atingir até 2050 um total de 300.000 toneladas. A estimativa é ainda maior se considerar o caso de descartes antecipados o que totaliza 750.000 toneladas no mesmo período. A 0 mostra o total de massa acumulada, em toneladas, no Brasil anualmente.

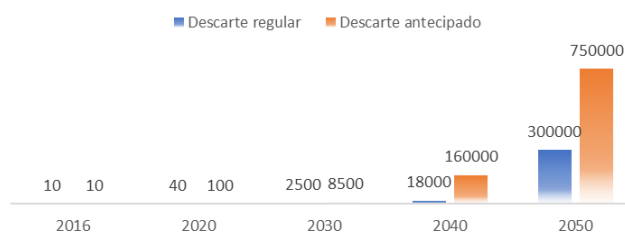


FIGURA 8. Estimativa acumulada da massa de resíduos de módulos FV descartados no Brasil.

Fonte: Adaptado de [13].

Estima-se que no Brasil serão descartados 32 milhões de módulos fotovoltaicos até 2050. [18] detalha sua estimativa da quantidade de módulos fotovoltaicos c-Si descartados no Brasil de 2013 até 2050 anualmente, considerando a vida útil de 30 anos, eventuais danificações, falhas, defeitos e tendência de uso de novas tecnologias. São estimados descartes de módulos de silício monocristalino e policristalino, totalizando mais de 5,6 e 18,8 milhões no período para cada tipo, respectivamente. Logo, nesta projeção, descartes entre 2013 e 2050 totalizariam 24.479.605 módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Estes dados incluem número de módulos descartados derivados de geração distribuída e centralizada.

Considerando o peso médio de um módulo FV de silício de aproximadamente 18,6 kg, [18] estima a massa de módulos descartados até 2050 em um total de 455.321 toneladas de material. A Tabela 1 detalha a massa descartada no mesmo período, por elementos presentes na composição dos módulos.

TABELA 1. ESTIMATIVA DA MASSA DESCARTADA ATÉ 2050 DE MÓDULOS DE SILÍCIO CRISTALINO POR COMPONENTES EM TONELADAS

<i>Materiais</i>	<i>Geração Distribuída</i>	<i>Geração Centralizada</i>
Vidro	103.824	233.842
Polímero	15.834	35.663
Alumínio	14.420	32.478
Silício	4.690	10.563
Cobre	798	1.797
Prata	14	32
Estanho	168	378
Zinco	168	378
Chumbo	84	189
Total	140.000	315.321

Fonte: Adaptado de [18].

3.2 Energia Conservada na Reciclagem

Cada material necessita de uma quantidade de energia elétrica durante seu processo de fabricação. Quando se adota um processo de reciclagem, além de reduzir o descarte de resíduos, uma quantidade de energia elétrica é evitada na produção. Deste modo, cada material agrega uma quantidade de energia elétrica [19].

Segundo [12], a reciclagem de um *wafer* retorna consideravelmente a energia utilizada na produção. Para produção de um módulo fotovoltaico são gastos, em média, 9,32 kWh/*wafer*, destes, a maior parte é proveniente da etapa da produção do silício (7,55 kWh/*wafer*). No entanto, o *wafer* reciclado exigiria 2,17 kWh em sua produção. Deste modo, é conservado 7,15 kWh de energia por *wafer* reciclado.

Conforme mostrado na seção 2 deste trabalho, a moldura geralmente é de alumínio e o cobre dos cabos da caixa de junção do módulo, eles possuem uma grande importância no processo de reciclagem dos módulos pois, além de reduzir significativamente a extração dos minérios, proporciona uma diminuição dos recursos energéticos e da quantidade de resíduos [19]. Segundo [20] os processos de extração, refinaria e fundição para a produção primária de alumínio, cobre, prata e silício, fazem uso intensivo de energia.

Ainda em [20] o autor afirma que utilizando uma planta de reciclagem de módulos FV, a cada 1000 kg de módulos FV descartados, é possível recuperar 135 kg de alumínio da moldura e 2,6 kg de cobre dos cabos na caixa de junção para processamento futuro. Nesta planta de reciclagem, o autor ainda sugere, a incineração com recuperação de energia para o polímero da caixa de junção e dos cabos, no entanto não é informado o valor energético recuperado.

Já segundo [19], cada tonelada de alumínio reciclado tem o potencial de conservação de 14,25 MWh. Metais ferrosos, tais como cobre, apresentam potencial de conservação 6,06 MWh por tonelada. Considerando o peso médio do módulo FV de 18,6 kg, anteriormente já mencionado, é possível conservar 35,78 kWh da moldura de alumínio e 293,06 Wh do cobre dos cabos da caixa de junção na reciclagem desses materiais.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através do arcabouço da literatura consultada, pesquisada e mostrada na seção 2, e através da estimativa de descarte dos módulos fotovoltaicos mostrada na seção 3, na presente seção será determinada a energia elétrica agregada aos materiais reciclados dos módulos FV. Deste modo, será possível realizar a estimativa de energia conservada na reciclagem dos módulos FV de silício mono e policristalino descartados no Brasil.

4.1 Potencial de Conservação dos Módulos Fotovoltaicos

Pelo exposto, a Tabela 2 totaliza a estimativa de energia conservada em um módulo fotovoltaico de silício cristalino reciclado.

TABELA 2. ESTIMATIVA DE POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA RECICLAGEM DE MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO CRISTALINO

<i>Parte do módulo FV</i>	<i>Potencial de conservação de energia elétrica (kWh)</i>
<i>Wafer</i>	7,15
Moldura de alumínio	35,78
Cabos de cobre na caixa de junção	0,293
Total (Energia por módulo FV)	43,22

Fonte: Autoria própria, 2021.

Com base nos dados de [13] e considerando o peso médio de um módulo FV como 18,6 kg [13], entre 2016 e 2050, supondo que essa tendência se confirme, é estimado o descarte entre 16,1 a 40,3 milhões de módulos FV, considerando o descarte regular e antecipado, respectivamente. Dados mundiais totalizam de 3,2 a 4,2 bilhões de módulos FV no mesmo período [13].

Assim, como apresentado na seção 2 deste trabalho, é estimado que 24.479.605 módulos FV de silício cristalino sejam descartados no Brasil [18] no período de 2013 a 2050. Esta quantidade de módulos c-Si equivaleria a um total 1.058 GWh de energia conservada por meio do processo de reciclagem dos materiais dentro do período analisado. Vale informar que nesta situação e para o valor obtido considerou-se apenas o potencial de conservação do *wafers*, moldura de alumínio e cabos de cobre externos. Para efeito de visualização do dado obtido anteriormente, tal valor equivaleria ao consumo residencial de energia elétrica do Estado de Tocantins somente no ano de 2019 [21].

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve seu objetivo cumprido, pois mostrou que uma quantidade considerável de energia elétrica pode ser evitada ao reciclar os materiais dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Foi possível estimar que a reciclagem dos módulos FV c-Si possui o potencial de conservar algo em torno de 43 kWh por módulo FV. Foi possível também mensurar que, conforme a estimativa de descartes de módulos c-Si no Brasil, entre 2013 e 2050, seria possível evitar o desperdício de energia na ordem de 1.058 GWh, com a reciclagem.

Cabe ressaltar, que o valor de potencial calculado abrangeu a reciclagem do *wafers*, do cobre dos cabos externos e o alumínio presente na moldura dos módulos FV c-Si e, ainda, considerando o peso de 18,6 kg médio do módulo. O valor energético, portanto, pode variar conforme eficiência da planta de reciclagem e dos tamanhos dos módulos FV avaliados.

A reciclagem dos módulos FV possui benefícios ambientais, além da redução do uso de recursos energéticos. O processo de reciclagem provoca maior aproveitamento dos materiais e redução de resíduos FV no ambiente ao evitar materiais em lixões/aterros, por exemplo. O reaproveitamento dos materiais também reduz a extração de minérios que não são renováveis.

Uma boa política de gestão dos resíduos dos módulos FV é essencial para garantir o aproveitamento dos materiais descartados e evitar o descarte inadequado, assim como, a criação ou ampliação de indústrias de reciclagem de módulos FV que também beneficia a sociedade por gerar novas oportunidades de emprego. Segundo a literatura utilizada, o processo de delaminação é a etapa mais difícil de reciclagem dos módulos fotovoltaicos de silício. Deste modo, a pesquisa e o desenvolvimento de maneiras de produzir módulos FV c-Si mais propícios a reciclagem pode permitir maior eficiência na recuperação dos materiais ocasionando menores impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- [1] KONZEN, Bárbara Anne Dalla Vechia; PEREIRA, Andrea Franco. Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1011>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- [2] ISE. Photovoltaics report. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- [3] PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2019.tde-30012019-141410. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [4] CRUZ, Fernanda Tátia; ISIDORO, Marcelo Henrique; FERNANDES, Igor Santos e. Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos. 2020. 16 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Ufop, Curitiba, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/17469>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- [5] DIAS, Pablo Ribeiro. Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [6] Universidade do Minho. Módulos fotovoltaicos características e associações. Repositorium.sdum.uminho.pt. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf. Acesso em: 30 jan. 2021.
- [7] STEINER, Kátia Helena. Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas. Riuni.unisul.br. Disponível em: <http://www.riuni.unisul.br/handle/12345/11914>. Acesso em: 27 abr. 2021.

- [8] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, [s. l.], v. 1, p. 47–499, 2014.
- [9] MAANI, THOMAS, CELIK, ILKEHEBEN, MICHAEL J. et al. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of The Total Environment*, v. 735, p. 138827, 2020.
- [10] FONSECA, José Eduardo Ferreira da. Avaliação da degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino em sistemas conectados à rede elétrica. Hdl.handle.net. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/206065>. Acesso em: 13 fev. 2021.
- [11] ITRPV - International Technology Roadmap for Photovoltaic. Results 2019 including maturity report 2020. Disponível em: <http://itrvp.vdma.org/download>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [12] FARRELL, C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, p. 109911, 2020.
- [13] IRENA - International Renewable Energy Agency; IEA-PVPS- International Energy Agency Photovoltaics Power Systems Programme. End of life management: solar photovoltaics panels. Report IRENA and IEA – PVPS, 2016.
- [14] NDIAYE, A. et al. Degradations evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in tropical environment. *Solar Energy* 103 (2014) 70–77.
- [15] MIRANDA, R.; LEANDRO, F.; SILVA, T. Gestão do fim de vida dos módulos fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/53355/pdf>.
- [16] SunR - Reciclagem Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.sunr.com.br/>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [17] IEA - International Energy Agency. *World Energy Outlook 2020*. 2020.
- [18] OLIVEIRA, Denis Bergamo de; LEBENSOLD, Felipe; OLIVEIRA, Lucas Tabuso de. Destinação final das placas fotovoltaicas pós consumo no brasil. 2017. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [19] ROCHA, Amanda Suianny Fernandes. Potencial de conservação de energia elétrica com a reciclagem de resíduos sólidos coletados na ufersa. 2016. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Ufersa, Mossoró, 2016.
- [20] FAIRCLOTH, C. et al. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 143, p. 260-272, 2019.
- [21] Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2020.