

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO: MBA EM GESTÃO AMBIENTAL

LORIANE STOLZ CISZ PORTES

GESTÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

CURITIBA

2021

LORIANE STOLZ CISZ PORTES

GESTÃO DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Ambiental, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Langer

CURITIBA

2021

RESUMO

PORTES, L.S.C.; Gestão do Descarte de Módulos Fotovoltaicos. 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Gestão Ambiental), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A crescente demanda por energia solar, como matriz de baixo carbono e renovável, associada ao bem estar e preservação do meio ambiente, é alternativa viável ao modelo energético atual. Dessa forma considerações ao correto descarte dos módulos fotovoltaicos se faz necessária. A garantia de eficiência de um módulo fotovoltaico é de 25 anos. O sistema gerador fotovoltaico compreende o conjunto de módulos fotovoltaicos, materiais elétricos, estrutura para suporte, inversores, controladores de carga e baterias. A legislação que regulamenta o descarte dos materiais elétricos, estrutura para suporte, inversores, controladores de carga e baterias é a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2010. Os componentes que ainda não estão regulamentados são os módulos fotovoltaicos. De acordo com a Resolução do CONAMA nº 307/04, os resíduos com características de periculosidade, conforme classificação da NBR 10.004/04 da ABNT, devem ser submetidos a tratamento e disposição final específico. O objetivo do trabalho é demonstrar a quantidade de resíduos contaminantes que vai ser descartada no Brasil até 2050. A metodologia utilizada foi revisão bibliográfica e a construção de cenários. Como resultado, no quadro atual brasileiro o volume de resíduos a ser gerado daqui a 30 anos vai ser de 774.289 toneladas, sendo composto por 95% de materiais recicláveis e 5% de materiais não recicláveis de alta periculosidade conforme a classificação Classe I de resíduos para alguns componentes. Portanto, novas leis deverão ser consideradas na legislação atual para que no futuro próximo o descarte desses módulos fotovoltaicos tenha o menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Energia Solar, Energia Fotovoltaica, Descarte Resíduos Sólidos, Sistemas Fotovoltaicos, Lixo eletrônico, Logística Reversa.

ABSTRACT

PORTES, L.S.C.; Photovoltaic Modules Disposal Management. 20 p. Undergraduate Thesis (MBA em Gestão Ambiental), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

The growing demand for solar energy, as a low-carbon and renewable matrix, associated with the well-being and preservation of the environment, is a viable alternative to the current energy model. Thus, considerations for the correct disposal of photovoltaic modules are necessary. The efficiency guarantee of a photovoltaic module is 25 years. The photovoltaic generator system comprises the set of photovoltaic modules, electrical materials, support structure, inverters, charge controllers and batteries. The legislation that regulates the disposal of electrical materials, support structure, inverters, charge controllers and batteries is the National Policy on Solid Waste, Law No. 12,305, of 2010. The components that are not yet regulated are photovoltaic modules. According to CONAMA Resolution No. 307/04, waste with hazardous characteristics, according to the classification of NBR 10.004/04 by ABNT, must be submitted to specific treatment and final disposal. The objective of the work is to demonstrate the amount of contaminating waste that will be discarded in Brazil by 2050. The methodology used was a literature review and the construction of scenarios. The results was in the current Brazilian framework, the volume of waste to be generated in 30 years it will be 774,289 tons, consisting of 95% of recyclable materials and 5% of highly hazardous non-recyclable materials according to the Class I waste classification for some components. Therefore, new laws should be considered in the current legislation so that in the near future the disposal of these photovoltaic modules has the least environmental impact.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Energy, Solid Waste Disposal, Photovoltaic Systems, Electronic Waste, Reverse Logistics.

1 INTRODUÇÃO

A humanidade utiliza a natureza como meio de sobrevivência, seja para alimentação, abrigo ou vestimenta. Com o advento do fogo, houve um salto na evolução do homem e foi possível produzir objetos metálicos e cerâmicos, impulsionando o desenvolvimento da civilização.

O salto evolutivo seguinte foi o surgimento da máquina a vapor, a qual também usava o fogo como fonte de energia e deu início ao processo de industrialização denominado de Revolução Industrial, período entre 1760 e meados de 1840 (HOBBSAWM, 1996). Esse período de grande desenvolvimento tecnológico teve início na Inglaterra a partir da segunda metade do século XVIII e se espalhou pelo mundo, causando grandes transformações.

Com o estabelecimento da Revolução Industrial estava garantido o surgimento da Indústria e consolidado o processo de formação do Capitalismo (IGLÉSIAS, 1981). As cidades passaram a ter maiores aglomerações, pois as populações migraram do campo para cidade a fim de trabalharem nas indústrias e obterem maiores ganhos com seus trabalhos. Houve então aumento de consumo de energia para aquecimento, moradias, vestimentas, alimentação, enfim, uma demanda infundável para a época (IGLÉSIAS, 1981).

Após tantos anos, enfrenta-se agora no século XXI, a necessidade de rever os conceitos da vida em sociedade, visto que os recursos naturais eram considerados como sendo inesgotáveis e hoje se corre o risco de esgotamento desses recursos naturais para as próximas gerações. O uso da energia solar como fonte energética de baixo carbono, renovável e gratuita tem se apresentado como uma boa alternativa para que consumidores e empresas busquem a eficiência energética.

Por meio da norma criada pela Resolução 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 17 de abril de 2012, é permitido o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica nacionais. A microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW) (RESOLUÇÃO ANEEL 482, 2012).

O objetivo deste trabalho foi dimensionar a quantidade de material oriundo do módulo fotovoltaico que será descartado no fim de sua vida útil, considerando os dados atuais e as projeções de crescimento anual do uso dessa matriz energética no contexto brasileiro.

O desempenho padrão de eficiência de um módulo fotovoltaico é de 25 anos funcionando com 80% de seu desempenho original (BONTORIN; SCOLLA, 2021). Após o período de garantia de eficiência de 25 anos o módulo fotovoltaico deve ser substituído. De acordo com autores e artigos técnicos a vida útil do módulo é em torno de 30 a 40 anos.

A maior parte do módulo fotovoltaico pode ser reciclada, atendendo à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS LEI 12305, 2010), mas uma parte desse material, a película fotovoltaica, além de não constar recomendações e diretrizes na Política Nacional de Resíduos Sólidos, não pode ser depositada em aterros comuns devido à sua composição, pois, possui elementos contaminantes como, por exemplo, o chumbo.

Para considerar a reciclagem da película fotovoltaica haveria a necessidade de separar todos os materiais que a compõe, mas, ainda não há uma tecnologia de reciclagem da película adequada no Brasil, sendo necessários pesquisa e desenvolvimento científico, além de estabelecer diretrizes e procedimentos de descarte atualizando as leis brasileiras para tal fim.

Como material desta pesquisa definiu-se a Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e como metodologia foi utilizada a pesquisa exploratória teórica (Gil, 2010). A pesquisa utilizou como método o conjunto de pesquisas bibliográficas, documentos legais e dados infográficos com o objetivo de proporcionar maior familiaridade ao problema e explicá-lo.

Foram estabelecidos cenários de impacto de crescimento da energia solar por meio de cálculos estimados do crescimento futuro, baseados em dados disponíveis para pesquisa e taxas de crescimento considerando a média histórica dos últimos cinco anos. Os cenários definidos foram: cenário atual e em cinco anos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 ENERGIA SOLAR

A utilização da energia solar aumentou muito como fonte de energia natural de baixo carbono e os investimentos para geração de energia elétrica a partir dessa fonte energética natural tem melhorado o processo como um todo. O sistema de captação, armazenamento e transformação da radiação solar consegue gerar energia elétrica para as edificações residenciais, comerciais e industriais, além de, favorecer o sistema elétrico onde essas edificações estão inseridas (SILVA, 2021).

Como vantagens desse sistema de energia fotovoltaica pode-se elencar: baixo custo de manutenção; baixo impacto ambiental; renovável; acesso a lugares isolados; curto prazo de instalação e operação; instalação em pequenas áreas; tecnologia crescente dos painéis e filmes de células fotovoltaicas orgânicas (OPV) e tendência de decréscimo do custo do sistema gerador (SILVA, 2021).

Sistemas de geração de energia solar integrados a edificações residenciais, comerciais e industriais existentes isentam os custos referentes à área ocupada por sistemas instalados junto ao solo. Dessa forma, pode-se considerar que a própria edificação quando existente possibilita a área e a estrutura de suporte, além da instalação elétrica predial, a qual funcionará como interface do gerador fotovoltaico com a rede elétrica convencional (RÜTHER, 2004).

O sistema de geração de energia solar ainda é recente no mercado consumidor brasileiro e questões importantes devem ser consideradas como: i. conforto ambiental com aproveitamento da tecnologia solar; ii. latitude solar para obtenção de maior eficiência; iii. composição formal da fachada na instalação de sistemas geradores de energia solar na edificação; iv. estruturas existentes das edificações versus peso do sistema gerador de energia solar; v. uso inteligente das fachadas com maior rendimento; vi. estudo do entorno para evitar sombreamento; vii. conhecimento das normas e legislação municipal para precaver multas no caso de alteração de fachada ; viii. conhecimento da legislação da agência reguladora ANEEL (REN ANEEL 482, 2012) e regras das distribuidoras de energia; ix. conhecimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº12.305, de 02 de agosto de 2010 (PNRS LEI 12305, 2010).

Neste ano de 2021, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) traduziu em números a matriz energética brasileira e de acordo com a agência essa matriz é composta por aproximadamente 2,6% (4.397 MW) de energia elétrica fotovoltaica podendo atingir 4,1% (7.753 MW) até o ano de 2025 (ONS, 2021), ou seja, existe um potencial enorme de exploração dessa fonte de energia.

Em uma pesquisa da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi possível mapear os principais estados de potência instalados em 2021: 1º lugar: Minas Gerais; 2º lugar: Rio Grande do Sul; 3º lugar: São Paulo; 4º lugar: Mato Grosso e 5º lugar: Paraná (SOLSTAR, 2021).

2.2 POLÍTICA BRASILEIRA SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, tem como objetivo principal o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil (PNRS LEI 12305, 2010). A legislação estabelece metas e objetivos para pessoas físicas e jurídicas relacionados ao gerenciamento de resíduos, com os seguintes propósitos: adequar o gerenciamento de resíduos às legislações e normativas existentes, preservação ambiental com a redução do uso de aterros e a logística reversa de resíduos pós-consumo (AMBIPAR, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) regulamenta o descarte de parte dos componentes do sistema fotovoltaico como materiais elétricos, estrutura para suporte, inversores, controladores de carga e baterias (PNRS LEI 12305, 2010). Os módulos fotovoltaicos não constam na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS LEI 12305, 2010).

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, os resíduos com características de periculosidade, classificados pela NBR 10.004/04, devem ser submetidos a tratamento e disposição final específico (CONAMA 307,2002).

A NBR 10.004, de 31 de maio de 2004, é uma norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde do homem. Os resíduos sólidos podem ser classificados e enquadrados nas seguintes categorias: Classe I – Resíduo perigoso e Classe II – Resíduo não perigoso, que é subdividida em Classe IIA – Não inertes e Classe IIB – Inertes (ABNT NBR 10004, 2004).

Para um resíduo ser considerado perigoso de Classe I, ele deve apresentar pelo menos uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade,

toxicidade, reatividade e/ou patogenicidade. Os resíduos de Classe IIA podem apresentar outras propriedades, sendo biodegradáveis, comburentes ou solúveis em água. Os resíduos de Classe IIB não apresentam solubilidade ou combustibilidade para tirar a boa potabilidade da água, a não ser no que diz respeito à mudança de sua cor, turbidez e sabor (ABNT NBR 10004, 2004).

Os países da União Europeia e os Estados Unidos estão mais avançados na gestão de fim de vida dos módulos fotovoltaicos. Por exemplo, na União Europeia, a partir de 2012, os módulos fotovoltaicos foram formalmente classificados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) na Diretiva Europeia de REEE 2012/19/EU e a logística reversa foi imposta a fornecedores, fabricantes, importadores e revendedores de módulos fotovoltaicos (ECYCLE, 2021).

2.3 TECNOLOGIA DOS SISTEMAS

Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Isolados (Off-grid) e Sistemas Conectados à Rede (Grid-tie).

Os Sistemas Isolados (Off-grid) são utilizados em locais remotos ou onde o custo de se conectar a rede elétrica é elevado: casas de campo, refúgios, iluminação, telecomunicações e bombeio de água.

Já os Sistemas Conectados à Rede (Grid-tie), substituem ou complementam a energia elétrica convencional disponível na rede elétrica. Os Sistemas Conectados à Rede (Grid-tie) são utilizados em áreas urbanas onde existe uma rede elétrica.

Um sistema fotovoltaico possui quatro componentes básicos: i. módulo fotovoltaico (painel solar) – bombeiam a energia para o sistema, podem ser um ou mais painéis e são dimensionados de acordo com a energia necessária e responsáveis por transformar energia solar em eletricidade; ii. controladores de carga – funcionam como válvulas para o sistema, servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho; iii. inversores – são responsáveis por transformar os 12 V de corrente contínua (CC) das baterias em 110 ou 220 V de corrente alternada (AC), ou outra tensão desejada, e no caso de sistemas conectados também são responsáveis pela sincronia com a rede elétrica; iv. baterias – armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol (NEOSOLAR, 2021).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

O módulo fotovoltaico possui células fotovoltaicas, que são dispositivos semicondutores, compostas por silício dopado com fósforo e boro, capazes de transformar a radiação solar diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

Essa dopagem é um processo que faz com que uma camada da célula fique negativa (com sobra de elétrons) e outra camada da célula fique positiva (com falta de elétrons), figura 1.

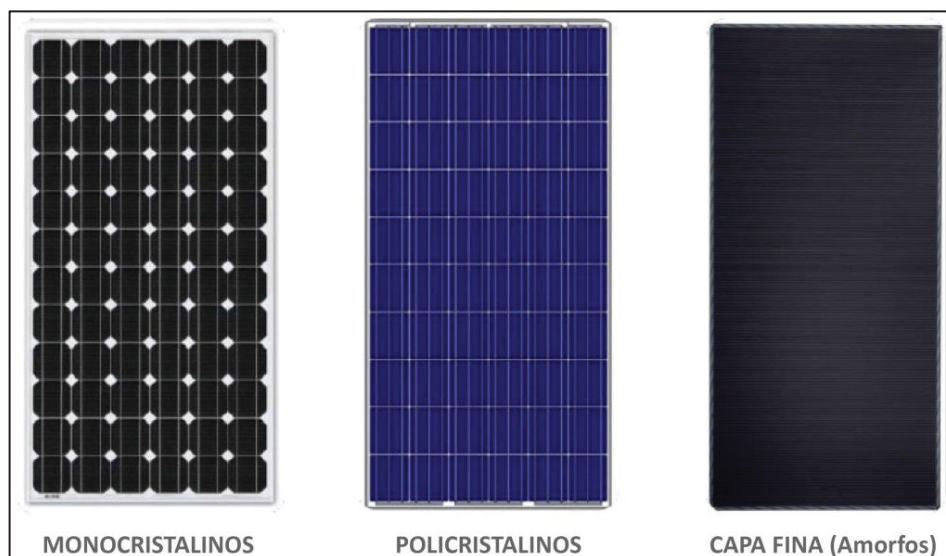
FIGURA 1 - PROCESSO PARA FABRICAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO



FONTE: PORTAL SOLAR (2021).

Os principais tipos de módulo fotovoltaico são: i. módulo fotovoltaico de silício monocristalino; ii. módulo fotovoltaico de silício policristalino e iii. módulo fotovoltaico de filme fino ou capa fina, figura 2.

FIGURA 2 – TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: MONOCRISTALINOS; POLICRISTALINOS E DE FILME FINO OU CAPA FINA



FONTE: ECOFENER (2021).

O módulo fotovoltaico de silício monocristalino é feito com um cristal de silício ultrapuro cortado em lâminas individuais que são tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são cortadas resultando em um espaço alinhado com bordas arredondadas. A eficiência energética varia entre 18% e 21% (ALDO, 2021).

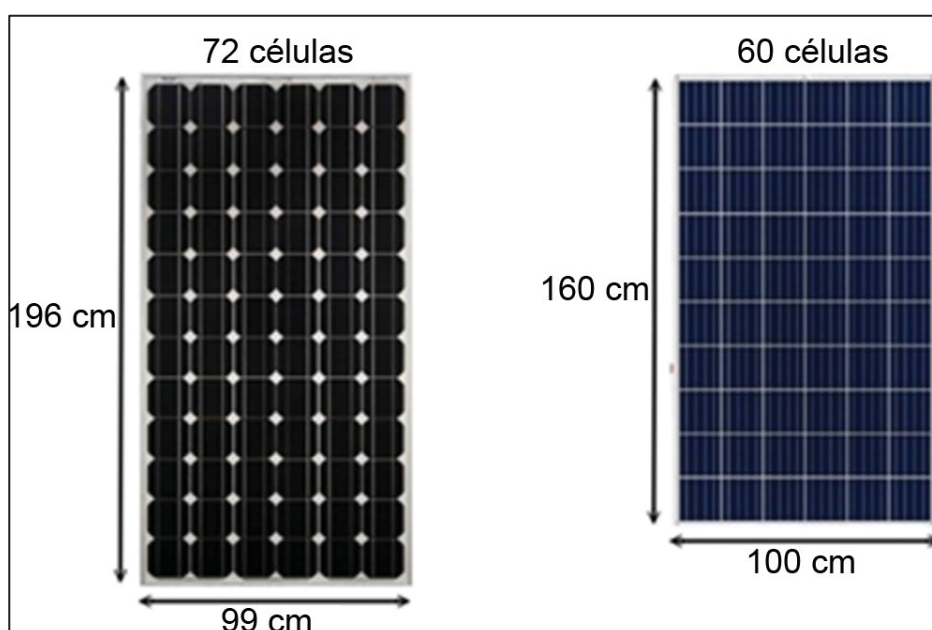
No módulo fotovoltaico de silício policristalino os cristais são fundidos em um grande bloco para que sejam formados múltiplos cristais, após são cortados em vários blocos quadrangulares que serão fatiados em células fotovoltaicas com bordas retangulares. Apresenta menor custo e eficiência de 13% a 18% (ALDO, 2021).

O módulo fotovoltaico de filme fino, também conhecido como células fotovoltaicas de capa fina (TFPV), é feito com várias camadas finas de material fotovoltaico colocado sobre um substrato. Existem vários subtipos sendo que a diferença entre eles é a composição do material depositado. São eles: Silício amorfo (a-Si); Telureto de Cádmio (CdTe); Cobre, Índio e Gálio seleneto (CIS / CIGS); Em média, a eficiência do painel fotovoltaico de filme fino gira em torno de 7% a 16%. (ALDO, 2021).

Para se ter uma ideia geral, os módulos solares fotovoltaicos têm um tamanho médio de: altura 160 cm a 170 cm; largura 90 cm a 100 cm; espessura 04 cm a 05 cm.

As medidas de um módulo solar fotovoltaico podem variar conforme o fornecedor e os componentes, mas a medida média de um painel policristalino encontrado no mercado é de 160 cm x 100 cm totalizando 1,60 m² por módulo solar fotovoltaico. Quanto à potência, os módulos fotovoltaicos monocristalinos geram em média 245 W e os módulos fotovoltaicos policristalinos geram média de 230 W (PORTAL ENERGIA, 2021), figura 3.

FIGURA 3 – MÓDULO FOTOVOLTAICO MONOCRISTALINO COM 72 CÉLULAS 245 W E MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO COM 60 CÉLULAS 230 W

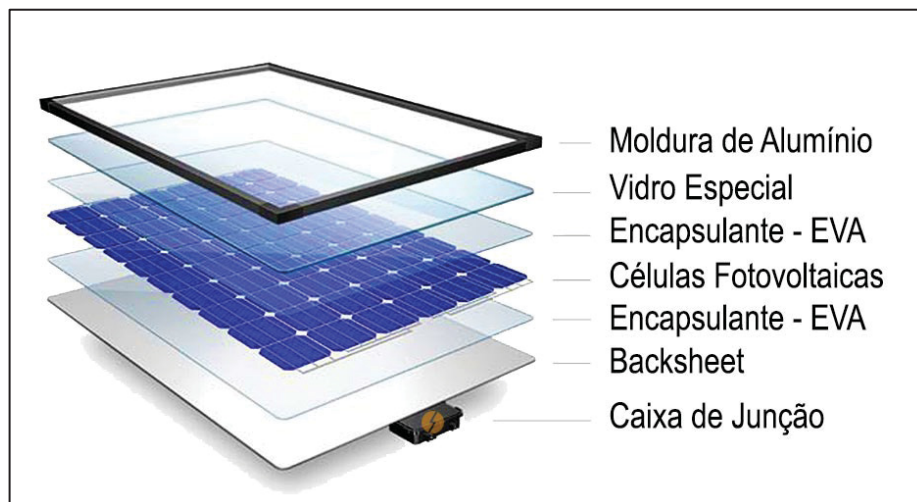


FONTE: ALDO (2021).

O módulo medindo 196 cm x 99 cm é um módulo fotovoltaico monocristalino com 72 células solares; e o módulo medindo 160 cm x 100 cm é um módulo fotovoltaico policristalino com 60 células solares. Os módulos fotovoltaicos policristalinos são os mais comercializados pelas empresas devido ao custo menor (ALDO, 2021).

Abaixo são demonstrados na figura 4 os itens que compõem o módulo fotovoltaico de silício: i. vidro especial; ii. caixa de junção; iii. moldura de alumínio; iii. células fotovoltaicas; iv. backsheet (fundo protetor); ivi. película encapsulante – EVA.

FIGURA 4 - ESTRATIFICAÇÃO DOS MATERIAIS EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO



FONTE: PORTAL SOLAR (2021).

Em sua composição os módulos fotovoltaicos apresentam uma variedade de materiais cerâmicos, polímeros e principalmente metais. Contatos metálicos de cobre recobertos com estanho e chumbo são inseridos entre a célula fotovoltaica e o encapsulante para conexão elétrica entre diferentes células (PRADO, 2018).

O *backsheet* é composto geralmente de Tedlar-PET-Tedlar (TPT, 70% do mercado), Poliamida-PET-Poliamida (APA, 10% do mercado) ou de Tedlar-PET-Poliamida (TPA, 20% do mercado) (PRADO, 2018).

Um módulo fotovoltaico policristalino tem cerca de 23 kg. O material com peso predominante é o vidro que corresponde por cerca de 74% do peso total. Polímeros plásticos são 11% do peso, alumínio são 10%, silício são 3% e ainda há em um painel: cobre (Cu), prata (Ag), estanho (Sn), zinco (Zn) e chumbo (Pb), com menos de 1% cada totalizando 2%. (OLIVEIRA, LEBENSOLD, OLIVEIRA, 2017). Os módulos fotovoltaicos medindo 160 cm x 100 cm com 230 W de potência são facilmente encontrados no comércio, sendo uma boa referência de mercado (ALDO, 2021).

2.5 CENÁRIOS

Para a determinação dos cenários analisados foi considerado o modelo fotovoltaico do tipo policristalino. Os fatores que determinaram a decisão de utilizar os módulos fotovoltaicos policristalinos para o exercício são os seguintes: i. são mais baratos, portanto, são mais econômicos; ii. menor quantidade de silício é

desperdiçada durante a sua produção; iii. os módulos têm bom desempenho em climas quentes, pois sua tolerância ao calor é maior; iv. estão facilmente disponíveis no mercado e são os mais utilizados pelas empresas de energia solar no Brasil (ECOCYCLE, 2021). Com base nessa decisão foi possível determinar os cenários para geração de energia renovável a partir dos modelos fotovoltaicos.

As tabelas desenvolvidas para este exercício foram elaboradas levando em consideração os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021) sobre a previsão de aumento da energia solar na matriz brasileira no Brasil.

Como exemplo prático foi utilizado um módulo fotovoltaico de 60 células nas medidas de 160 cm x 100 cm de capacidade de 230 W (ALDO, 2021) para que o resultado fosse a estimativa do volume dos resíduos gerados em toneladas para o período definido para este estudo (cenário atual ano 2021, 2022, 2023, 2024 e 2025).

Na tabela 1 é apresentada a projeção de crescimento do uso de energia solar fotovoltaica de acordo com as previsões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para a matriz elétrica brasileira (ONS, 2021) considerando o cenário atual e em quatro anos.

TABELA 1 – PROJEÇÃO DE CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR BRASILEIRA EM MEGAWATT (MW) NO CONTEXTO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM CINCO ANOS

ANO	POTÊNCIA MW	PERCENTUAL DA MATRIZ BRASILEIRA
2021	4.397	2,60%
2022	6.526	3,66%
2023	6.932	3,81%
2024	7.191	3,90%
2025	7.753	4,10%

FONTE: ONS (2021).

Na tabela 2 é apresentada a estimativa de quantidades de módulos fotovoltaicos necessários para atender a projeção de crescimento da energia solar na matriz elétrica brasileira, bem como a área em m² necessária para obtenção da energia proposta na tabela 1.

TABELA 2 – QUANTIDADE DE MÓDULOS CALCULADOS EM FUNÇÃO DO CENÁRIO ATUAL E EM QUATRO ANOS

QUANTIDADE DE MÓDULOS PARA POTÊNCIA 230 W		
ANO	N° de Módulos	Quantidade de área (m ²)
2021	19.117.391	11.948.369,57
2022	28.373.913	17.733.695,65
2023	30.139.130	18.836.956,52
2024	31.265.217	19.540.760,87
2025	33.708.696	21.067.934,78

FONTE: O AUTOR (2021).

O cálculo do número de módulos fotovoltaicos na tabela 2 foi realizado levando em consideração o módulo fotovoltaico policristalino de 230 W de potência, para cada um dos cenários: cenário atual ano 2021, 2022, 2023, 2024 e 2025. E a quantidade de área em m² foi obtida pelo número de módulos fotovoltaicos em cada ano dividido por 1,60 m² da área do módulo fotovoltaico policristalino medindo 160 cm x 100 cm.

O objetivo da definição dos cenários em atual (ano 2021) e em quatro anos (2022, 2023, 2024 e 2025) foi no intuito de despertar a devida visão para a quantidade de módulos fotovoltaicos que estão sendo instalados para a geração de energia elétrica e que no fim de sua vida útil, em 25 anos, esses módulos fotovoltaicos serão descartados.

A preocupação é que 5% do módulo fotovoltaico é composto por materiais não recicláveis sem a aplicação correta de tecnologia de reciclagem, pois os elementos são recicláveis separadamente. Esses materiais não recicláveis do módulo fotovoltaico contêm metais pesados como, por exemplo, o chumbo, e não podem ser dispostos em aterros sanitários comuns e apresentam elevado potencial de poluição por contaminação ambiental dos recursos edáficos e também, hídricos.

2.6 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Na tabela 3 estão elencados a distribuição e o cálculo do peso dos materiais de fabricação dos módulos fotovoltaicos policristalinos, para descarte após o fim da vida útil dos mesmos dando o peso em toneladas para os respectivos cenários:

cenário atual e em quatro anos. Classificando também os materiais em percentual como ordem de grandeza e identificando-os como reciclável e não reciclável.

TABELA 3 – CÁLCULO DO PESO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO E QUANTIDADE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ESTIMADOS NO CENÁRIO ATUAL E EM QUATRO ANOS NO BRASIL

CÁLCULO POR MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO DE 60 CÉLULAS 160 cm X 100 cm 230 W CADA NO BRASIL							
MATERIAL COMPONENTE DO PAINEL	PESO Unitário (kg)	ANO 2021 PESO (t)	ANO 2022 PESO (t)	ANO 2023 PESO (t)	ANO 2024 PESO (t)	ANO 2025 PESO (t)	%
Vidro (contendo antimônio 0.01-1%/kg de vidro)	17,02	325.378	482.924	512.968	532.134	573.722	74%
Polímero plástico EVA	2,53	48.367	71.786	76.252	79.101	85.283	11%
Alumínio	2,30	43.970	65.260	69.320	71.910	77.530	10%
TOTAL DO MÓDULO RECICLÁVEL	21,9	417.715	619.970	658.540	683.145	736.535	95%
Silício (célula solar)	0,69	13.191	19.578	20.796	21.573	23.259	3%
Cobre (conectores)	0,23	4.397	6.526	6.932	7.191	7.753	1%
Prata	0,02	440	653	693	719	775	0,1%
Estanho	0,02	440	653	693	719	775	0,1%
Zinco	0,02	440	653	693	719	775	0,1%
Chumbo	0,13	2.504	3.717	3.948	4.096	4.416	0,7%
TOTAL DO MÓDULO NÃO RECICLAVEL	1,1	21.411	31.779	33.756	35.017	37.754	5%
Peso 1 módulo de 60 células 160 cm x 100 cm	23,00						
POTÊNCIA MW	0,00023						
TOTAL DO MÓDULO RECICLÁVEL+NÃO RECICLAVEL		439.126	651.749	692.296	718.162	774.289	100%
ANOS DE GERAÇÕES DE RESÍDUOS		2046	2047	2048	2049	2050	TOTAL
VOLUMES ESPERADOS ESTIMADOS		439.126	212.622	40.547	25.866	56.127	774.289

FONTE: O AUTOR (2021).

O total de resíduos de módulos fotovoltaicos a serem descartados no Brasil em 2050, vinte e cinco anos de vida útil após 2025, será de 774.289 toneladas, de acordo com a tabela 3, sendo que 95 % desses resíduos serão recicláveis, totalizando 736.535 toneladas, e 5% desses resíduos serão não recicláveis de acordo com as tecnologias e sistemas de gestão atuais, totalizando 37.754 toneladas. Esses materiais podem ser reciclados (ECYCLE, 2021). As estimativas nos cenários propostos já ultrapassam a previsão da IRENA para o Brasil de 550.000 toneladas de resíduos até 2050 (IRENA, 2020).

Na tabela 3 o total estimado de material não reciclável de módulos fotovoltaicos instalados para geração de energia em 2021 é estimado em 21.411 toneladas, portanto em 25 anos, ou seja, em 2046 o Brasil terá que descartar essa

quantidade de material não reciclável corretamente para evitar danos ao meio ambiente.

Ainda na tabela 3, em 2025 o total estimado de material não reciclável de módulos fotovoltaicos instalados para geração de energia aumenta para 37.754,00 toneladas. Nessa quantidade de material não reciclável a ser descartado em vinte e cinco anos, ou seja, em 2050, encontram-se 4.416 toneladas de chumbo, que de acordo com a NBR 10004/04 da norma ABNT, trata-se de metal tóxico o qual não deve ser descartado em aterros sanitários comuns, e demandará sistema de coleta, processamento e destinação adequados.

Em 2021 o Paraná tem 5,5% de potência instalada em geração de energia solar (SOLSTAR, 2021), ficando em 5º lugar entre os estados brasileiros. Cruzando esse dado com os dados da tabela 3, podem-se estimar para o estado do Paraná 42.585 toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos a serem descartados em 2050, totalizando 40.456 toneladas de resíduos recicláveis e 2.129 toneladas de resíduos não recicláveis com metais pesados.

O estado de Minas Gerais tem 18,1% de potência instalada em geração de energia solar (SOLSTAR, 2021), ficando em 1º lugar no Brasil. Isso corresponde a 140.146 toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos a serem descartados em 2050 em Minas Gerais, totalizando 133.139 toneladas de resíduos recicláveis e 7.007 toneladas de resíduos não recicláveis com metais pesados.

Em 3º lugar ficou o estado de São Paulo, com 12,5% de potência instalada em geração de energia solar (SOLSTAR, 2021). Corresponde a 96.786 toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos a serem descartados no estado de São Paulo em 2050, totalizando 91.947 toneladas de resíduos recicláveis e 4.839 toneladas de resíduos não recicláveis com metais pesados.

No Brasil não existe uma lei de controle e recuperação de resíduos de módulos fotovoltaicos, portanto a destinação final desses materiais não recicláveis que compõem os módulos fotovoltaicos quando estiverem obsoletos ou danificados para aterros sanitários comuns pode trazer danos ao meio ambiente. Essa contaminação será decorrente dos elementos componentes dos módulos fotovoltaicos, como chumbo e demais metais, bem como, por outro lado, haverá desperdício de recursos materiais e financeiros potencialmente recicláveis se forem tratados como lixo eletrônico, além dos custos para descontaminação ambiental, caso sejam descartados de acordo com os sistemas atuais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

São quatro os pontos a serem destacados na conclusão desse trabalho:

O não atendimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS LEI 12305) aos requisitos e características técnicas dos painéis fotovoltaicos. Essa falta de lei e regulamentação própria para o correto descarte trará danos ao meio ambiente. A Política Nacional de Resíduos Sólidos regula o descarte de alguns componentes do sistema de geração fotovoltaica como materiais elétricos, estrutura para suporte, inversores, controladores de carga e baterias, mas não faz referência em seu texto de Lei aos módulos fotovoltaicos e seus componentes contaminantes.

O rápido crescimento e a demanda contínua da energia fotovoltaica levarão a um ambiente global com preocupações com o descarte sustentável por conta do grande volume de resíduos total, reciclável e não reciclável por ano e nos anos considerados no estudo.

Os sistemas de reciclagem atuais não têm tecnologia para recuperar todos os resíduos gerados no descarte dos módulos fotovoltaicos. A reciclagem do módulo fotovoltaico é ainda inexistente para os 5% não recicláveis, visto não existir no Brasil tecnologia para separar os materiais de forma viável.

O problema dos contaminantes e metais pesados do módulo fotovoltaico quando for descartado no fim de sua vida útil em aterros comuns. O material que compõe parte do módulo fotovoltaico, hoje considerado não reciclável, pode contaminar o meio ambiente por conta dos resíduos altamente perigosos como o chumbo e demais metais pesados. O total de resíduos de módulos fotovoltaicos a serem descartados no Brasil em 2050, vinte e cinco anos de vida útil após 2025, será de 774.289 toneladas, sendo que 95 % desses resíduos serão recicláveis, totalizando 736.535 toneladas, e 5% desses resíduos serão não recicláveis de acordo com as tecnologias e sistemas de gestão atuais, totalizando 37.754 toneladas.

3.1 SUGESTÕES DE AÇÕES FUTURAS

Nesse caso observa-se a necessidade de haver uma lei específica ou a inclusão dos módulos fotovoltaicos na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), visando a separação dos metais tóxicos dos materiais com possibilidade de

reciclagem. A reciclagem do módulo fotovoltaico doméstico e comercial pode recuperar materiais de alto valor (por exemplo, silício, prata, cobre) para uso na fabricação nacional ou para venda em mercados externos (CURTIS, 2021).

Incentivos a empresas terceirizadas que venham a prestar serviços de reciclagem utilizando métodos seguros de separação. Deve ser utilizado sistema de triagem inicial para avaliação dos módulos fotovoltaicos. Na sequência a retirada mecânica do quadro de alumínio exterior, dos conectores e da caixa de junção. Por fim a retirada do vidro e do plástico. O material restante deverá ser tratado quimicamente para a separação de outros metais (SUNR, 2021).

Após a coleta e separação, os materiais são enviados para seus devidos compradores, que são empresas de reciclagem e beneficiamento dos materiais puros, que transformarão os materiais coletados em matérias-primas com as características necessárias para cada tipo de indústria a que se destinam e mesmo aqueles materiais que não forem possíveis de reciclar e não podem ser descartados por sua toxicidade, esses podem ser utilizados como combustível alternativo em fornos de cimento.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) as questões da logística reversa devem ser consideradas para que a empresa que forneça os módulos fotovoltaicos seja também responsável pelo correto descarte e reciclagem quando do retorno do material utilizado.

A urgência de procedimentos e diretrizes para estabelecer regras comerciais aplicáveis a uma economia circular e também uma legislação específica para reciclagem e descarte correto desse sistema solar fotovoltaico é imprescindível. Um estudo aprofundado deve ser realizado baseado na provável progressão do alcance desses sistemas de energia solar pela população civil como um todo, onde as instalações desses geradores solares são realizadas sem maiores preocupações com o futuro descarte.

Também é necessário que a pesquisa e o desenvolvimento científico estejam presentes na formulação de novas tecnologias de reciclagem dos materiais que ainda não são possíveis de serem separados e reaproveitados, visando um total aproveitamento do material utilizado para o uso da energia solar, bem como pensando em uma futura economia circular trazendo a possibilidade de novos ganhos para as empresas que investirem em tecnologia para separação e reutilização total dos sistemas geradores solares incluindo os módulos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10004.

Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 10/09/2021.

ABNT NBR 16690. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pub.aspx?ID=2974>. Acesso em: 02/10/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 11/10/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída. Publicações. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fbusca%3Fp_auth%3D72IFVSfx%26p_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D1%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_state_rcv%3D1&_101_assetEntryId=18723889&_101_type=content&_101_groupId=656877&_101_urlTitle=brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida&inheritRedirect=true. Acesso em: 12/03/2019.

ALDO. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/categoria/energia-solar/produtos/painel-solar>. Acesso em: 07/09/2021.

AMBIPAR. Disponível em <https://ambipar.com/noticias/conheca-os-5-principais-objetivos-da-politica-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 08/10/2021.

BONTORIN, J. P.; OLIVEIRA, V. R. Análise do Ciclo de Vida de Módulos Fotovoltaicos. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98303>. Acesso em: 06/10/2021.

CURTIS, Taylor L.; BUCHANAN, H.; HEATH, G.; ; SMITH, L.; SHAW, S. (2021) Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-74124. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74124.pdf>. Acesso em: 05/09/2021.

DESING, H.; WIDMER, R.; BELOIN-SAINT-PIERRE, D.; HISCHIER, R.; WÄGER, P. (2019) Powering a Sustainable and Circular Economy—An Engineering Approach to Estimating Renewable Energy Potentials within Earth System Boundaries. Energies.

ECOFENER. Disponível em: <https://ecofener.com/>. Acesso em: 05/10/2021.

ECYCLE. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/reciclagem-de-paineis-solares/>. Acesso em: 08/09/2021.

ELYSIA. Disponível em: <https://elysia.com.br/painel-solar-monocristalino-e-policristalino/>. Acesso em: 05/10/2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Ano 2020. Publicações. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 07/10/2021.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOVERNO FEDERAL - GOVERNO DO BRASIL. Energia renovável chega a quase 50% da matriz energética brasileira. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1>. Acesso em: 10/10/2021.

HOBBSAWM, E. The Age of Revolution: Europe 1789–1848, Weidenfeld & Nicolson Ltd. London, 1996.

IGLÉSIAS, F. A Revolução Industrial. São Paulo: Brasiliense, 1981.

INMETRO. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/sistema-fotovoltaico.asp>. Acesso em: 03/10/2021.

IRENA. Disponível em: <https://www.irena.org/>. Acesso em: 05/10/2021.

JANNUZZI, G. de M.; SWICHER, J.; REDLINGER, R. Planejamento integrado de recursos energéticos: oferta, demanda e suas interações. 2ª. Edição. Campinas. IEI, 2018. Padrão Apostila (iei-brasil.org)

LATUNUSSA, C.; MANCINI, L.; BLENGINI, G.; ARDENTE, F.; PENNINGTON, D. (2016) Analysis of material recovery from photovoltaic panels. EUR 27797. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; doi:10.2788/786252.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS) LEI 12305. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 01/09/2021

MIRANDA, R. T. Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos, utilizando o estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para comparar duas estratégias de gestão de fim de vida. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2019.

NEOSOLAR. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 05/09/2021.

NREL. Disponível em: <https://www.nrel.gov/research/publications.html>. Acesso em: 01/10/2021.

OLIVEIRA, D. B.; LEBENSOLD, F.; OLIVEIRA, L. T. Destinação final das placas fotovoltaicas pós-consumo no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 13/10/2021.

PORTAL SOLAR. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br>. Acesso em: 11/10/2021.

PORTAL ENERGIA. Quais as medidas standard dos painéis solares fotovoltaicos. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/medidas-paineis-solares-fotovoltaicos-147346/>. Acesso em: 08/09/2021.

PRADO, P. F. de A. Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

RESOLUÇÃO NORMATIVA 482 - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 06/09/2021.

RÜTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos. 1. ed. Florianópolis – SC: LABSOLAR/UFSC, 2004.

SCOLLA, M. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia fotovoltaica: uma análise sob a ótica de fatores ambientais, 2021.

SILVA, Dr. D. A. da. Energias Naturais Renováveis [Apostila]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2021.

SILVEIRA, N. S.; SILVEIRA, N. S. Análise Energética e Ambiental de Módulos Fotovoltaicos Comercializados em Curitiba: Um Estudo de Caso. 109 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia), Escola Politécnica da Universidade Positivo. Curitiba, 2020.

SOLSTAR. Energia solar no Brasil: entenda o crescimento dessa indústria do país. Disponível em: <https://solstar.com.br/2021/06/01/energia-solar-no-brasil-mercado-que-mais-cresce-no-pais/>. Acesso em: 01/10/2021.

SUNR. Disponível em: <https://sunr.com.br/>. Acesso em: 08/09/2021.