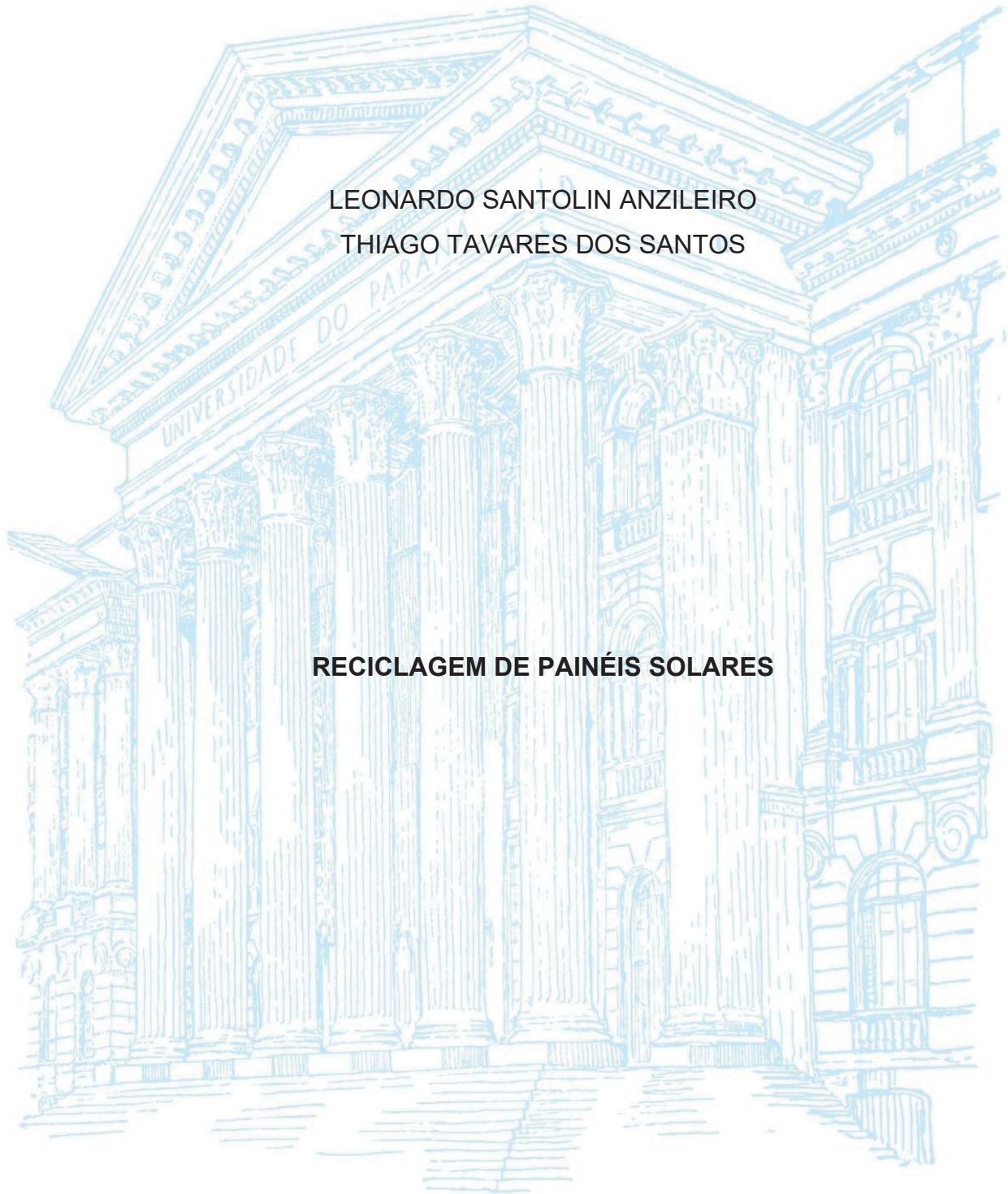


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO SANTOLIN ANZILEIRO
THIAGO TAVARES DOS SANTOS

RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES



CURITIBA

2021

LEONARDO SANTOLIN ANZILEIRO
THIAGO TAVARES DOS SANTOS

RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA

2021

RESUMO

A energia renovável vem crescendo vertiginosamente em todo o globo, tendo em vista que já são conhecidos os impactos negativos do uso de combustíveis fósseis para o meio ambiente. Dentro do rol de tecnologias disponíveis atualmente para a geração de energia limpa, a energia solar fotovoltaica vem se destacando entre as demais pela sua praticidade e viabilidade econômica e segue em plena ascensão no Brasil, onde já contribui de maneira significativa na matriz energética do país. Todavia, é fato que os módulos solares têm uma vida útil projetada de cerca de 25 anos, sendo que, após esse período, eles normalmente são descartados de forma inadequada. A reciclagem se apresenta então como uma alternativa que busca mitigar possíveis impactos ao meio ambiente, além de proporcionar a reutilização dos componentes em outras frentes. O presente trabalho disserta sobre o estado da arte da reciclagem de módulos fotovoltaicos, ressaltando sua importância, bem como quantifica o volume de resíduos associados a essa tecnologia no futuro.

Palavras-chave: Reciclagem, Módulos Fotovoltaicos, Meio ambiente.

ABSTRACT

Renewable energy has been growing across the globe, given that the fossil fuels negative impacts for both energy generation and the environment, are already known. Within the list of technologies currently available for the generation of clean energy, photovoltaic solar energy has stood out among the others because it is practical and economically viable and continues to grow in Brazil, where it already contributes significantly to the country's energy matrix. However, it is a fact that the solar modules have a projected useful life of around 25 years, and after that period, they are usually inappropriately discarded. Recycling is an alternative that seeks to mitigate possible impacts on the environment, in addition to providing the reuse of components on other applications. The present work discusses the state of the art about photovoltaic modules recycling, emphasizing its importance, in addition to quantifying the volume of waste associated with this technology in the future.

Keywords: Recycling, Photovoltaic Modules, Environment

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CÉLULA FOTOVOLTAICA E MÓDULO SOLAR.	7
FIGURA 2 – ESTRATIFICAÇÃO DOS MATERIAIS EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO.....	8
FIGURA 3 –PROJEÇÃO GLOBAL DE RESÍDUOS ASSOCIADOS À TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.	10

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UM MÓDULO FV DE 1ª GERAÇÃO.....	9
---	---

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS MÓDULOS	8
2.2. VIDA ÚTIL DOS MÓDULOS	9
2.3. RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	10
2.4. MÉTODOS DE RECICLAGEM	11
3. RESULTADOS E CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13

1. INTRODUÇÃO

Não é de hoje que o crescimento populacional é objeto de discussão mundial, e tem evidenciado questões preocupantes, como a energia elétrica disponibilizada para atender a toda a população. Com isso, as diversas fontes de energia, principalmente as renováveis, vêm sendo discutidas e aprimoradas (Borges, 2012).

Segundo dados publicados pelo BEN – Balanço Energético Nacional 2016 (ano base 2015), em âmbito global os combustíveis fósseis são a base da oferta de energia primária dos países. Em paralelo, o Ministério de Minas e Energia (MME, 2016) observou que a oferta mundial de energia por fonte em 2013 foi composta por 31,1% de petróleo, 28,9% de carvão mineral, 21,4% de gás natural e apenas 10,2% de fontes renováveis.

Dentre as diversas fontes de energia renovável existentes, a fotovoltaica vem se destacando como uma das mais proeminentes, principalmente no Brasil, onde o seu potencial de aproveitamento é enorme. Segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), a região nordeste do país se destaca por ter índices de radiação solar diária (o principal parâmetro analisado para a escolha da melhor localidade para instalação de painéis solares) similares às melhores regiões do mundo, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no deserto de Mojave, Califórnia (Salamoni, 2009).

Rüther (2012) prossegue afirmando que bastaria apenas 0,045% da área total do território nacional, ou seja, 3.844 km² de painéis fotovoltaicos, para gerar toda a energia consumida no Brasil em 2010, que foi de 455,7 TWh, o que demonstra como essa fonte de energia renovável pode contribuir de forma significativa na matriz energética nacional, ainda que tenha uma participação muito inferior à sua capacidade total.

Devido a crescente procura por fontes de energia limpa e em particular a de energia fotovoltaica, é fato que a produção desse tipo de tecnologia vem crescendo vertiginosamente nos últimos anos. Todavia, Klugmann-Radziemska e Ostrowski, (2010) pontuam que a vida útil dos painéis solares é em média de 25 anos, logo, é pertinente pensar no volume expressivo de equipamentos que serão descartados como lixo eletrônico nas próximas décadas. Surgem então questões convenientes: qual a melhor forma de descartá-los? É possível reutilizá-los para outros fins?

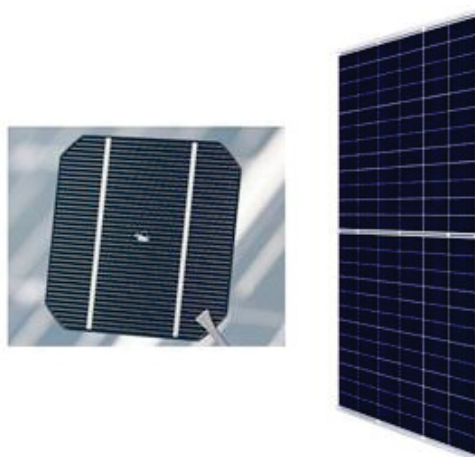
Atualmente, assim como outros produtos oriundos de fabricações industriais em massa, o descarte de módulos dificilmente é ecológico. Implicando que um dos principais impactos do descarte incorreto dos resíduos deste equipamento são a contaminação de solos e da água devido os metais pesados, além da perda de recursos convencionais (principalmente vidro e alumínio) e até mesmo de metais raros como a prata, o índio, o gálio e o germânio (Véronique Monier, 2011). Marsh (2018) ainda expõe que a reciclagem de painéis solares também terá impacto na economia, pois diversos materiais possuem valor econômico de interesse e que, se recuperados, podem ser reciclados facilmente (Brouwer et al., 2011).

Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte da reciclagem dos módulos solares além de quantificar os volumes de materiais e elementos que podem ser reaproveitados no futuro, quando do fim da vida útil dos módulos, complementando a ideia de ser uma tecnologia totalmente renovável, desde a sua fabricação, passando por seu uso e até o seu descomissionamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos compostos de materiais semicondutores, onde apresentam um conjunto de células fotovoltaicas (Figura 1), com a função de converter a irradiação solar incidente em energia elétrica (Ghizoni, 2016). Fisicamente, os fótons da luz estimulam os elétrons a saltar para a camada de condução, e é nesse movimento entre o espaço e a banda de condução que a energia elétrica é gerada e “coletada” pelos condutores dos módulos fotovoltaicos Fraidenraich (1995).

FIGURA 1 – CÉLULA FOTOVOLTAICA E MÓDULO SOLAR.



FONTE: adaptado de PINHO E GALDINO (2014).

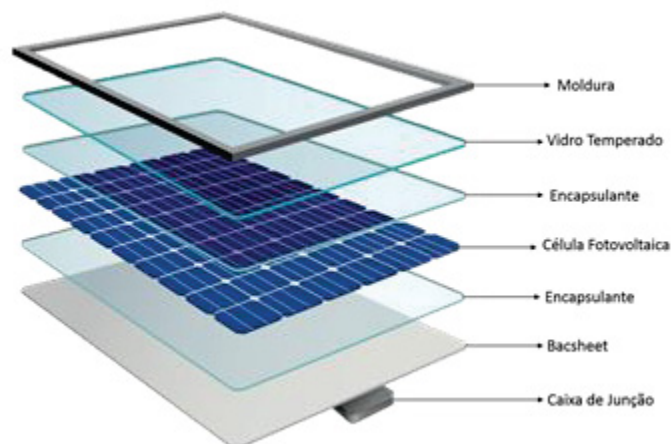
Atualmente, três tecnologias são empregadas na produção de módulos fotovoltaicos. Subdividas em três gerações distintas (1ª, 2ª e 3ª), se diferenciam de acordo com o material utilizado e suas características (Ghizoni, 2016). A primeira geração é composta pelos módulos de silício cristalino (c-Si) convencionais (tanto mono quanto policristalinos), enquanto que a segunda geração é conhecida por empregar o uso dos chamados filmes finos, elaborados principalmente a partir do material semicondutor Telureto de Cádmio – CdTe.

Por fim, a terceira geração, denominada concentrador fotovoltaico (CPV), faz uso de lentes e espelhos curvos para direcionar a luz sobre células solares pequenas, mas altamente eficientes, semelhantes às da primeira geração. Atualmente essa tecnologia tem sua viabilidade econômica muito questionada, por ainda estar em desenvolvimento, porém com grandes expectativas futuras (Proença, 2007).

2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS MÓDULOS

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) são constituídos de diversos materiais com finalidades específicas, conforme mostra a Figura 2.

FIGURA 2 – ESTRATIFICAÇÃO DOS MATERIAIS EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO



FONTE: Adaptado de NIELAND (2012).

O vidro temperado fornece resistência mecânica e transparência óptica. Já o material encapsulante, conhecido como Acetato Vinil Etileno (EVA), envolve a célula fotovoltaica, embarcando assim o elemento semicondutor, impedindo qualquer movimentação irregular das células em caso de impactos. Estão presentes também os

contatos metálicos de cobre recobertos com estanho e chumbo, utilizados para interconectar eletricamente as diversas células do módulo. A parte traseira, chamada de backsheet, é composta por material conhecido como Tedlar, que tem por objetivo proteger a parte posterior do painel contra a umidade e a entrada de gases. Por fim, uma estrutura rígida de alumínio envolve todos os elementos, dando resistência e leveza ao produto final.

Latunussa et. al. (2016) estimou a distribuição dos diversos materiais que compõem um módulo fotovoltaico, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UM MÓDULO FV DE 1ª GERAÇÃO

Componente	Porcentagem (%)
Vidro	70
Alumínio (Al) (moldura)	18
Encapsulante (EVA)	5,1
Célula solar (c-Si)	3,65
Backsheet	1,5
Cabos (cobre e polímeros)	1
Condutor interno (Al)	0,53
Condutor interno (Cu)	0,11
Prata (Ag)	0,053
Outros metais (Sn, Pb)	0,053
Total	100

2.2. VIDA ÚTIL DOS MÓDULOS

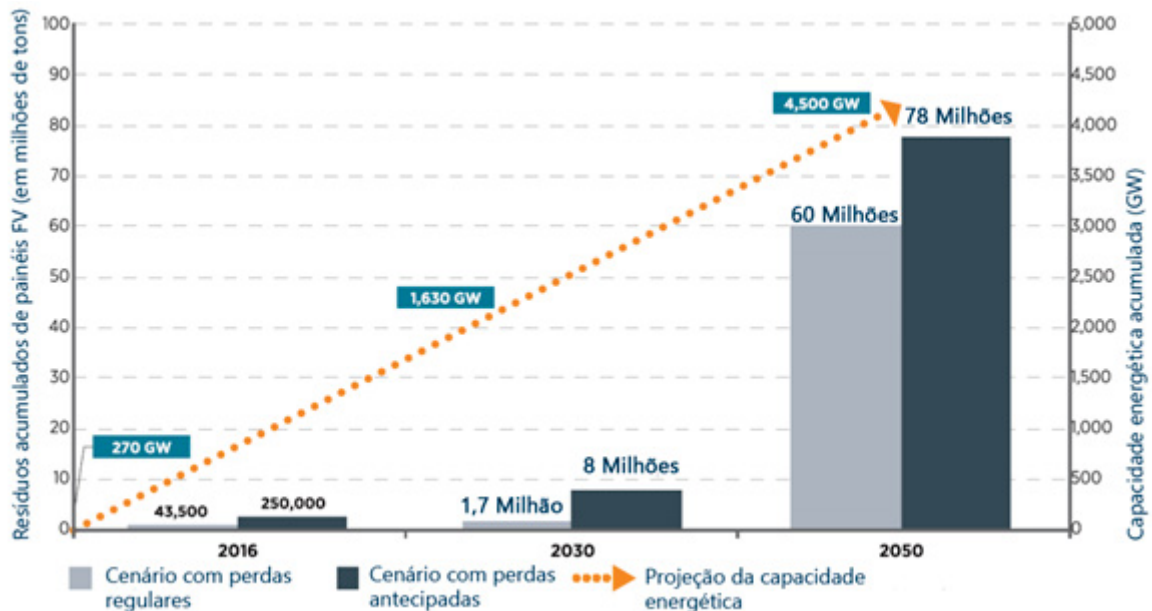
Os módulos fotovoltaicos têm durabilidade média de 25 a 30 anos, quando então atingem 80% de sua eficiência nominal inicial (Kazmerski, 2006). Após esse período, a eficiência cai ainda mais, configurando assim o encerramento do seu ciclo de vida.

Os principais fatores que influenciam na diminuição da vida útil desses equipamentos são a erosão da superfície de vidro, que permite que água e oxigênio penetrem no encapsulante, causando oxidação e corrosão dos contatos, fazendo a resistência interna aumentar, e como consequência disso, diminuindo tanto a potência quando a eficiência dos módulos (Czanderna, 1996). Outro fator que impacta é a própria radiação ultra violeta, que deteriora o encapsulante (Doi et. al, 1992)(Kang et. al., 2012).

Tendo em vista o gap existente entre o início do funcionamento das placas e o fim de sua vida útil, atrelado ao grande volume de sistemas fotovoltaicos comercializados atualmente, é esperado então, que dentro de 15 a 30 anos exista um grande desafio relacionado à gestão dos resíduos associados à tecnologia fotovoltaica,

que atingirão um volume estimado de 78 milhões de toneladas, em 2050, conforme projeta a Figura 3.

FIGURA 3 –PROJEÇÃO GLOBAL DE RESÍDUOS ASSOCIADOS À TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.



FONTE: adaptado de WECKEND (2016).

2.3. RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Atualmente a reciclagem em larga escala de módulos fotovoltaicos esbarra em diversos desafios, muitos deles semelhantes aos encontrados no gerenciamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, os chamados REEEs. Dificuldades com relação a rotas de processamentos economicamente viáveis, da coleta desses materiais, e até mesmo da ausência de legislação específica são alguns exemplos (Yi et. al, 2016).

Embora o alumínio, o vidro e cobre sejam os principais materiais presentes nos módulos, Paiano (2014) complementa o grande potencial ainda não explorado de outros materiais chave, como o silício, a prata (presente na pasta de interconexão das células) e até mesmo do antimônio, encontrado no vidro.

Além disso, Yi et al. (2016) afirmam que entre 2030 e 2050, a prata, o cobre e o alumínio serão os metais de maior interesse na reciclagem de módulos, tendo em vista que hoje eles correspondem entre US\$0,54/W a US\$1,70/W do custo de produção das placas feitas de silício cristalino.

Vale frisar também o impacto positivo que a reciclagem da prata trará, tendo em vista que ela é o material mais caro na fabricação das células de silício (Peeters et. al, 2017) e somente em 2015, 14% de todo o consumo mundial deste elemento foi devido ao seu uso em módulos fotovoltaicos (Prado, 2018).

2.4. MÉTODOS DE RECICLAGEM

Os métodos atuais de reciclagem de módulos fotovoltaicos consistem majoritariamente em recuperar o vidro e o semicondutor, ao passo que, no futuro, as estratégias de reciclagem focarão na recuperação dos materiais.

O processo atual é dividido em 3 etapas, segundo Tao (2015): primeiramente a delaminação, onde se eliminam as fases poliméricas, seguida da separação dos materiais na segunda etapa, e por fim, a extração dos metais na terceira etapa, também chamada de purificação.

O principal desafio envolve a remoção do encapsulante que protege a célula de silício. Para tal, emprega-se a técnica conhecida como calcinação, onde o módulo é aquecido entre temperaturas de 450°C e 600°C. Assim, após a degradação do EVA o material resultante passa por um tratamento físico em moinhos de facas ou martelos, equipamentos estes que reduzem os sólidos em frações menores, para então se fazer uso de processos de lixiviação e refino para a recuperação dos materiais presentes (Doi et. al., 2001) (Klugmann-Radziemska, 2012).

Com o emprego dessas técnicas é possível recuperar, em média, até 90% dos principais componentes dos módulos, que podem até mesmo ser reaproveitados para a produção de novas células fotovoltaicas (Cruz et. al., 2020).

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A energia solar fotovoltaica vem se consolidando nos últimos anos como uma alternativa bastante acessível entre as tecnologias disponíveis atualmente para geração de energia renovável, principalmente no Brasil, que possui um grande potencial ainda não explorado. Incentivos governamentais, como a redução de impostos de importação, por exemplo, e a regulamentação do setor através de leis e normas que garantiram segurança jurídica aos agentes participantes desse mercado, permitiram que essa tecnologia se difundisse de maneira expressiva país afora,

ampliando sua participação dentro da matriz energética brasileira, que ainda concentra nas hidrelétricas o seu principal fornecedor.

Na esteira desse crescimento, fabricantes incrementaram seus parques fabris para atender ao aumento da demanda, exigindo uma maior extração dos recursos naturais dos quais são feitos os módulos, aumentando desta forma a disponibilidade de tal tecnologia, porém contribuindo com o volume futuro de resíduos associados a ela, quando do encerramento da sua vida útil.

Como o advento em larga escala dessa tecnologia é relativamente recente, ainda não se tem um volume expressivo de material descartado, sendo este pico esperado para acontecer nos próximos 20 a 30 anos, onde projeções estimam que até 2050 atinjam a ordem de 78 milhões de toneladas.

Embora ainda não seja amplamente difundida e esbarre em dificuldades como logística reversa e principalmente na inexistência de legislação específica que trate do tema no Brasil, a reciclagem de módulos fotovoltaicos já é uma realidade, tendo em vista que já existem processos mapeados que buscam extrair os principais elementos presentes nessa tecnologia, com uma eficiência na ordem de 90%.

O grande potencial de reciclagem de elementos como a Prata (Pb), o Cobre (Cu) e o Alumínio (Al), que representam uma parcela significativa do custo de fabricação dos módulos solares, além do silício (Si) do qual é feita a célula solar, justifica o gasto associado a esse processo, com potencial para reutilização desses materiais até mesmo para a fabricação de novas células fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, Manuel. **Geração de energia elétrica**. 1º Edição. Local de publicação: Saraiva , 2012.
- 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://generalengineering.sjsu.edu/docs/pdf/mse_prj_rpts/fall2011/METHODS%20AND%20CONCERNS%20FOR%20DISPOSAL%20OF%20PHOTOVOLTAICS.pdf>. Acesso em: 25 out. 2020.
- CRUZ, Fernanda Tátia; ISIDORO, Marcelo Henrique; FERNANDES, Igor Santose. **Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos / disposal, recycling and reverse logistics**. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 6, n. 9, p. 73294-73309, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-693>.
- CZANDERNA, A. W.; PERN, F. J. **Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review**. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 43, n. 2, p. 101-181, 1996.
- DOI, T.; TSUDA, I.; UNAGIDA, H.; MURATA, A.; SAKUTA, K.; KUROKAWA, K. **Experimental study on PV module recycling with organic solvent method**. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 25, n.1-2, p. 3-23, 1992.
- FRAIDENRAICH, Naum. **Energia solar**. 1º Edição. Local de publicação:Universidade UFPE, 1995.
- GHIZONI, Joana Pauli. **Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o brasil**. Florianopolis,2016. Universidade Federal de Santa Catarina Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.
- KANG, S.; YOO, S.; LEE, J.; BOO, B.; RYU, H. **Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules**. Renewable Energy, v. 47, p. 152-159, 2012.
- KAZMERSKI, L. L. **Solar photovoltaics R & D at the tipping point: A 2005 technology overview**. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, v. 150, p.105-135, 2006.
- LATUNUSSA, C. E. L.; 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, v. 156, p. 101-111, 2016.
- MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – Empresa de Pesquisa. Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- NIELAND, S. E.; NEUHAUS, U; PFAFF T.; RÄDLEIN, E. **New approaches for component recycling of crystalline solar modules**. Electronics Goes Green 2012+, 2012. Berlin.
- PAIANO, A. **Photovoltaic waste assessment in Italy**. Renewable &. Sustainable Energy Reviews, v. 41, p.99-112, 2014.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. 530 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 09 nov. 2020.

PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. **Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos e Recuperação de Materiais**. 2018. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PROENÇA, E.D.R.B. **A energia solar fotovoltaica em Portugal. Estado da arte e perspectivas de desenvolvimento**. Universidade Técnica de Lisboa. Agosto, 2007.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**. 1º Edição. Local de publicação: UFSC / LABSOLAR, 2004.

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SAMPAIO, C. A. C.; ALVES, F. K.; FALK, V. C. V. **Arranjo socioproductivo de base comunitária: Interconectando o turismo comunitário com redes de Comércio justo**. Turismo Visão e Ação, v. 10, n 2. p. 244-262, 2008.

SINGER, P. **Introdução à economia solidária**. 3ª ed. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2002.

TAO, J.; Yu, S. **Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules**. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 141, p. 108-124, 2015.

VÉRONIQUE MONIER (France). **European Commision. Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive**. Paris, 2011.

VILLALVA, Marcelo. **Energia solar fotovoltaica**. 2015. 2º Edição. Local de publicação: Saraiva, 2015.

WECKEND, S.; WADE, A.; HEATH, G. **End of life management: Solar photovoltaic panels**. 2016.

Yi, Y. K.; Kim, H. S.; Tran, T.; Hong, S. K.; Kim, M. J. **Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 64, n. 7, 797-807, 2016.