

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

DEIVIDY RHUAM BRAYNER DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE RECICLAGEM DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**PORTO ALEGRE/RS
2022**

DEIVIDY RHUAM BRAYNER DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE RECICLAGEM DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos

**PORTO ALEGRE/RS
2022**

DEIVIDY RHUAM BRAYNER DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE RECICLAGEM DEMÓDULOS
FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos

Aprovado em: 04/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Fernando Santos

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Felipe Detzel Kipper

Co-orientador: Eng. Energia MSc. Felipe Detzel Kipper
3S – Solar Sustainable Solutions

Rossini

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

**PORTO ALEGRE/RS
2022**

Catálogo de Publicação na Fonte – (CIP)

M294

Brayner da Silva, Deividy Rhuam.

Avaliação de diferentes metodologias de reciclagem de módulos fotovoltaicos/ Deividy Rhuam Brayner da Silva. – Porto Alegre, 2022.

41 f.

Orientador: Prof. Dr Fernando Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso Engenharia em Energia, Unidade de Porto Alegre, 2022.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Módulo fotovoltaico. 3. Reciclagem de Módulos.
4. Trabalho de Conclusão de Curso. I. Santos, Fernando. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Carina Lima CRB10/1905

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser minha base durante toda minha trajetória acadêmica e pessoal, sendo meu alicerce para alcançar meus sonhos e objetivos.

Agraço a minha esposa Fabiola por todo o apoio e compreensão durante todo o período de minha graduação, sem isso nada disso seria possível.

Agradeço também meus pais Rogério e Mariana e demais familiares pelo apoio incondicional durante os últimos anos e também pelos incentivos.

Por fim, ao professor Dr. Fernando Santos e Msc. Felipe Detzel Kipper por toda a orientação, apoio e paciência para a execução deste trabalho de conclusão.

RESUMO

A relação entre o consumo e a produção de energia elétrica tem se alterado ao longo dos anos ao redor de todo o mundo. A sociedade tem consumido cada vez mais energia elétrica e com isso a necessidade de atender essa demanda tem aumentado significativamente. De forma a atender essa necessidade as fontes alternativas têm se tornado uma solução viável para sanar esse problema. Os módulos solares fotovoltaicos (FV) têm se tornado uma expoente alternativa dentro da geração distribuída, sendo uma fonte de geração de energia cada vez mais viável e estimulada pelos governos mundiais através de incentivos fiscais e políticas pró meio ambiente, fomentando a implementação da tecnologia, tanto em soluções de geração residencial quanto em escala industrial. Entretanto, os módulos FV têm vida útil de aproximadamente 30 anos, portanto após este período, sua eficiência cai vertiginosamente, tendo o valor de 80% de sua potência nominal indicada em seu catálogo/datasheet e então seguindo a queda de eficiência. A composição dos módulos possui elementos de alto valor econômico que podem ser reaproveitados e reutilizados para a gerar novos módulos FV ou para diversas aplicações. Analisando o cenário global, observou-se que em 2018 a produção de energia elétrica formada a partir da fonte fotovoltaica foi de 512 GW e que segue projeções de aumento, portanto, a reutilização e reciclagem dos materiais se torna uma alternativa a ser considerada, visto que a massa de resíduo projetada para os anos de 2030 é de 8 milhões de toneladas. Desta maneira a necessidade de reciclagem dos módulos fotovoltaicos tem aumentado e se tornado uma pauta importante no cenário global, contudo, ainda não há uma técnica de reciclagem solidificada pois ainda não existem estudos suficientes para se determinar qual a melhor prática de reciclagem a ser utilizada: observa-se a possibilidade de reciclagem através de técnicas mecânicas, térmicas e químicas em módulos fotovoltaicos em fim de vida útil, entretanto os estudos ainda se encontram em fase inicial.

Palavras-Chave: Módulos fotovoltaicos, reutilização, reciclagem, fim de vida útil.

ABSTRACT

The relationship between consumption and production of electricity has changed over the years around the world. Society has been consuming more and more electrical energy and with that the need to meet this demand has increased significantly. In order to meet this need, alternative sources have become a viable solution to solve this problem. Photovoltaic (PV) solar modules have become an alternative exponent within distributed generation, being an increasingly viable source of energy generation and stimulated by world governments through tax incentives and pro-environment policies, encouraging the implementation of technology, both in residential and industrial-scale generation solutions. However, PV modules have a useful life of approximately 30 years, so after this period, their efficiency drops dramatically, having the value of 80% of their rated power indicated in their catalog/datasheet and then following the efficiency drop. The composition of the panels has elements of high economic value that can be reused and reused to generate new PV modules or for different applications. Analyzing the global scenario, we observe that in 2018 the production of electric energy formed from the photovoltaic source was 512 GW and that it follows projections of increase, therefore, the reuse and recycling of the materials becomes an alternative to be considered, since the projected waste mass for the 2030s is 8 million tons. In this way, the need for recycling photovoltaic modules has increased and has become an important agenda in the global scenario, however, there is still no solidified recycling technique because there are still not enough studies to determine the best recycling practice to be used: there is the possibility of recycling through mechanical, thermal and chemical techniques in photovoltaic modules at the end of their useful life, however the studies are still at an early stage.

Key-words: Photovoltaic modules, reuse, recycle, end of life cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito Fotovoltaico.....	17
Figura 2 – Junção PN	19
Figura 3 – Composição convencional de módulo fotovoltaico	20
Figura 4 - Contribuição de diferentes fontes de produção de energia elétrica na Europa em 2019	21
Figura 5 - Comparativo da produção elétrica europeia entre os anos de 1974 e 2020	22
Figura 6 – Comparativo da produção elétrica global entre os anos de 1974 e 2020	23
Figura 7 – Matriz Elétrica Brasileira.....	24
Figura 8 - 10 maiores consumidores de energia elétrica mundial e seu respectivo consumo em 2019.....	25
Figura 9 - Percentual de falhas observadas em módulos solares fotovoltaicos a partir de relatos de consumidores	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Gerações de FV e suas principais características	26
Quadro 2 - Técnicas experimentais de reciclagem.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FV – Fotovoltaico
GW – Giga Watts
CO₂ – Dióxido de carbono
EOL – End of life
MT – Milhões de toneladas
EVA – Acetato vanila-etileno
TWh – Tera watt hora
R\$ - Reais
\$ - Dólares
Nº - Número
Al – Alumínio
Cr – Cromo
Mn – Manganês
As – Arsênio
Cu – Cobre
Pb – Chumbo
Cd – Cádmio
Fe – Ferro
Se – Selênio
Sn – Estanho
Zn – Zinco
Sb – Antimônio
Te – Telúrio
Ag – Prata
Ga – Gálio
In – Índio
Mo – Molibdênio
Ni – Níquel
c-Si – Silício cristalino
KOH – Hidróxido de Potássio
ICMS – Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e serviços
IPI – Imposto sobre produtos industrializados

HNO₃ – Ácido Nítrico

HF – Ácido fluorídrico

CH₃COOH – Ácido Etanóico

REEE – Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Eletrónicos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO GERAL.....	16
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	DESENVOLVIMENTO.....	17
3.1.	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	17
3.2.	JUNÇÃO PN.....	18
3.3.	CONSTITUIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	20
4.	PRODUÇÃO ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	21
4.1.	PRODUÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL.....	23
5.	GERAÇÕES DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS	25
5.1.	RESÍDUOS DOS MÓDULOS FV E SEU DESPERDÍCIO	26
6.	METODOLOGIA.....	30
7.	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FV ..	31
7.1.	RECICLAGEM QUÍMICA.....	33
7.2.	RECICLAGEM TÉRMICA.....	34
7.3.	RECICLAGEM MECÂNICA	36
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
9.	TRABALHOS FUTUROS.....	38

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é a energia proveniente da irradiação solar, que tem sido utilizada para aplicações diversas como aquecimento de água, energia heliotérmica e principalmente a energia solar fotovoltaica, que é a conversão direta da irradiação solar em energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico, que tem crescido ao longo dos anos e se consolidando como uma fonte alternativa confiável para a produção de energia elétrica tanto em escala industrial (para aplicações no agronegócio, por exemplo) quanto para aplicações residenciais, dependendo da necessidade do cliente e seu perfil de consumo.

No Brasil, a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica atingiu 15,2GW no ano de 2022, que representa cerca de 82 bilhões de reais em investimentos no segmento, aproximadamente 460 mil novos empregos gerados, mais de 22 bilhões de reais em impostos arrecadados, mais de 22 milhões de toneladas de CO₂ evitadas (Absolar, 2022)

O crescimento do consumo energético ao redor do mundo tem impulsionado o rápido crescimento da tecnologia FV, se consolidando como um grande expoente na geração de energia limpa, caracterizada pela não emissão de carbono (Curtis *et al.*, 2021). Atualmente, a produção de energia elétrica global através da utilização dos módulos solares FV representa 3% do total produzido. O crescimento desta tecnologia pode ser observado através da produção de energia elétrica gerada a partir dos módulos FV que aumentou de 1,4 GW em 2000 para 512 GW em 2018 e segue uma projeção cumulativa de 4500 GW para 2050, que representa uma contribuição percentual de cerca de 16% para o cenário mundial projetado. (Heath *et al.*, 2020)

A difusão da fonte FV está fortemente associada à crise energética atual, que por sua vez, é ligada à dependência da utilização dos combustíveis fósseis para a produção de energia em escala global e à falta de recursos de produção energética relacionado a determinados lugares. Muitos segmentos têm estudado a viabilidade de implementação dos módulos FV em razão do payback a médio prazo. O investimento muitas vezes é embasado pela necessidade de energia elétrica de grandes consumidores mundiais que possuem espaço físico vital para instalação dos módulos em suas unidades consumidoras.

A diversificação da matriz energética gera uma maior segurança para os países quanto sua produção elétrica, atualmente podemos observar a crise do leste europeu

entre Rússia e Ucrânia, em que a Ucrânia é dependente da importação energética da produção russa, então, devido à crise bélica, houve falta de abastecimento energético, gerando altos impactos elétricos aos ucranianos, já que a Ucrânia não é capaz de produzir a mesma quantidade de energia que consome.

Os incentivos fiscais têm estimulado o mercado mundial e incentivado a utilização de fontes alternativas para a produção elétrica, a exemplo do Brasil, que zerou a taxa de importação para módulos FV e inversores no ano de 2021, tal mudança aquece a produção global para fornecimento de material especialmente da China, que representa 90% das 10 empresas que mais fabricaram módulos FV em 2017, que tem destaque na produção dos módulos e sua comercialização para os consumidores ao redor do mundo.

Entretanto, a produção em massa dos módulos FV e sua difusão como uma fonte confiável de produção de energia traz danos colaterais conforme o acúmulo de massa de módulos FV em estágio avançado de degradação que não atendem mais à taxa de eficiência prevista por sua composição, os módulos FV em fim de vida útil (EOL). Projeções indicam que em 2030 a massa acumulada de módulos em EOL atingirá 8 milhões de toneladas (Mt). Em 2050, estudos também projetam que a massa acumulada de módulos EOL se aproximará de 80 milhões de toneladas (Mt) (IRENA, 2016).

As projeções analisam o crescimento exponencial global de módulos FV em razão de seu tempo de vida médio de 30 anos. Entretanto, o tempo de vida útil dos painéis pode ser reduzido devido às falhas que atingem especialmente os módulos solares fotovoltaicos mais antigos, em especial: exposição à ciclos mecânicos, mudanças potenciais de temperatura, falha nos contatos da caixa de junção, quebra do vidro, quebras das interconexões das células e defeitos do diodo de desvio (IRENA, 2016). Dentre as principais falhas não associadas à intemperes climáticas e fatores externos, a falta de manutenção preventiva dos módulos interferem diretamente em sua eficácia quanto na redução no tempo de vida dos módulos FV. Estudos mostram que a probabilidade de perda através da degradação dos módulos durante seu ciclo de vida pode ser calculada através do modelo da função de Weibull. Conforme indicado na Equação 1. Essa função demonstra o fator de degradação de um módulo fotovoltaico com o passar dos anos e sua provável perda. (IRENA, 2016):

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^\alpha} \quad (1)$$

Onde:

t – Tempo em anos

T – Tempo de vida médio

α – Fator de forma (coeficiente que controla a equação em relação às perdas)

Anualmente 41,8 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos são produzidas ao redor do mundo, sendo 250 mil toneladas provenientes do desperdício associado aos módulos FV, o que representa uma taxa de aproximadamente 0,6% do total produzido (Heath *et al.*, 2020).

Concomitantemente à perda dos FV de forma precoce ou simplesmente no tempo de vida médio de 30 anos, a possibilidade de reaproveitamento dos módulos tem ganhado força nas projeções globais conforme a difusão da tecnologia e sua aceitação. Atualmente a razão entre módulos danificados e novos módulos a serem instalados ainda é baixa, cerca de 0,1% (IRENA, 2016). Entretanto, a facilidade de recuperação dos componentes dos módulos FV possui uma relação (teórica) inversamente proporcional à pureza do material a ser recuperado, bem como a necessidade de técnicas físico-químicas (ainda não se estabeleceu de forma sólida uma técnica para a reciclagem dos materiais) para a separação dos materiais, o que gera uma barreira financeira a ser superada.

Atualmente, ainda não se tem um método consolidado quanto à separação dos materiais presentes nos módulos fotovoltaicos, sendo assim um impeditivo para o avanço na reutilização dos tais materiais para outros fins (ou para a produção de novos módulos).

2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão das metodologias utilizadas para reciclagem/reutilização dos módulos solares fotovoltaicos em fim de vida útil e seus respectivos impactos econômicos e ambientais.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar as metodologias utilizadas para a reciclagem dos módulos solares com bases em estudos já existentes.
- b) Comparar os resultados obtidos dos métodos empregados para a reciclagem dos módulos.
- c) Avaliar os impactos econômicos e ambientais do lixo proveniente da não reciclagem dos módulos fotovoltaicos.

3. DESENVOLVIMENTO

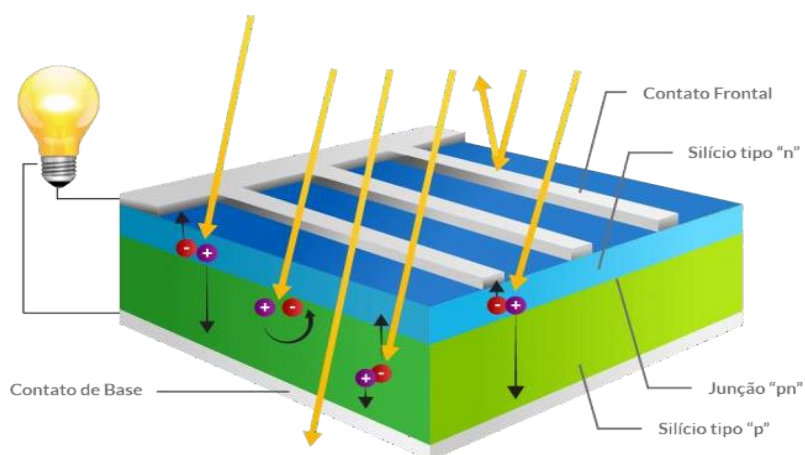
O referencial teórico adotado estará compreendendo os seguintes conceitos: efeito fotovoltaico, junção PN, constituição dos módulos fotovoltaicos, produção energética e energia solar fotovoltaica, produção energética no Brasil, gerações de módulos solares fotovoltaicos e resíduos dos módulos fotovoltaicos e seu desperdício.

3.1. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico ocorre devido a absorção de luz por uma célula eletroquímica, desta forma, gerando uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre os terminais da célula (Pinho e Galdino, 2014).

Através da emissão de um fóton, que incide sobre o material semiconductor, há a possibilidade de absorção, reflexão ou transmissão deste mesmo fóton. Considerando que o fóton é absorvido por um elétron na banda de valência, é possível que o elétron vá da banda de valência para a banda de condução, se o mesmo absorver energia suficiente para superar o gap entre as bandas (Yang *et al.*, 2018). Na Figura 1 podemos ver a representação do efeito fotovoltaico .

Figura 1 - Representação do efeito fotovoltaico



Fonte: Bluesol, 2022

Quando os fótons são emitidos da banda de valência para a de condução a energia excedente se dissipa no material na forma de calor, este fenômeno denomina-se termalização (Pinho e Galdino, 2014).

As propriedades de um material semicondutor são determinadas pela estrutura de ligação do mesmo. Os elétrons na ligação covalente formada entre os átomos do material semicondutor se mantêm no lugar da ligação, ficando localizado ao redor do átomo, esses elétrons não são considerados elétrons livres pois não podem interagir no fluxo de corrente. Quando os elétrons se encontram em temperaturas elevadas eles conseguem ganhar energia necessária para superar o “gap” de energia para se desprenderem e serem considerados elétrons livres (Pveducation, 2022).

No efeito fotovoltaico os elétrons movimentam-se pelo material e acabam por aumentar sua condutividade elétrica. De acordo com o Manual da Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos (2014), este efeito é aproveitado para a fabricação de fotorresistores e fotocélulas em que a luminosidade que incide no material acarreta por variar a resistência elétrica, entretanto, para que se separem os portadores de corrente e tensão, faz-se necessário a aplicação de um campo elétrico. Tal feito consegue ser realizado através da junção PN (Pinho e Galdinho, 2014).

3.2. JUNÇÃO PN

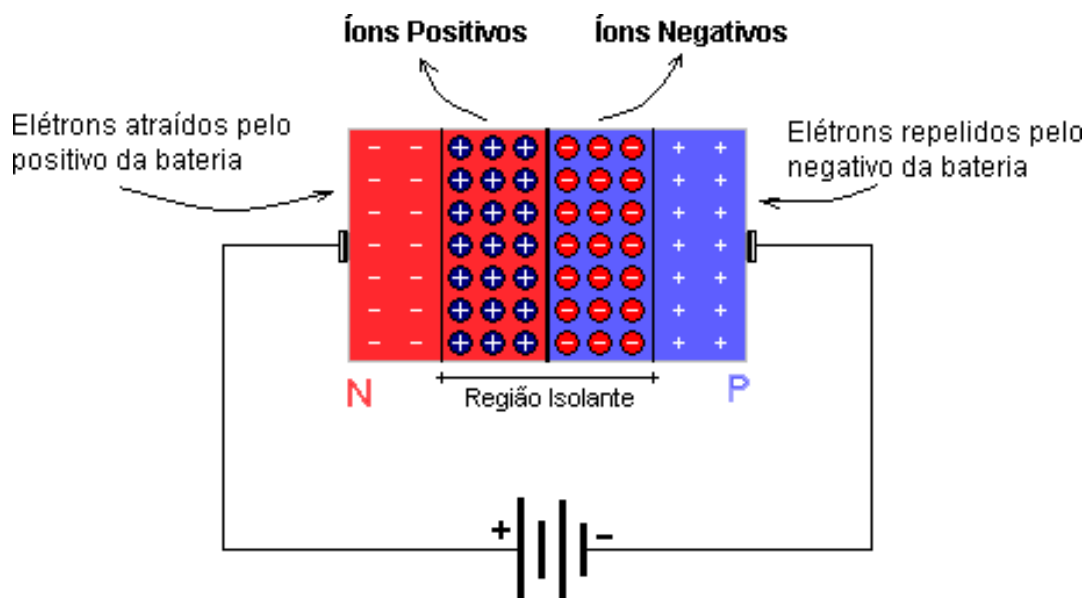
Para a construção da junção PN é necessário que impurezas sejam inseridas no semicondutor para que as características elétricas do material sejam alteradas (realização de dopagem).

Na dopagem, átomos que possuem elétron de valência a mais que o silício (material mais utilizado para fabricação de módulos solares fotovoltaicos) são utilizados para a produção de um material semicondutor do tipo “n”, os quais são elementos que se localizam no grupo V da tabela periódica por terem 5 elétrons de valência, que possibilita a formação de ligações covalentes com os 4 elétrons de valência do silício (Pveducation, 2022).

O material tipo “p” é o resultado de átomos com um elétron de valência a menos, tais materiais são pertencentes ao grupo III da tabela periódica, então, o material tipo “p” possui somente 03 elétrons em sua camada de valência para realizar ligação covalente com os átomos livres do silício. Como não há elétrons suficientes para a realização das 04 ligações covalentes, gera-se um buraco (Pveducation, 2022).

A excitação térmica de um portador da banda de valência para a banda de condução gera portadores livres nas duas bandas. O material semiconductor que não teve a adição de impurezas em sua composição para que sua concentração fosse alterada é denominado material intrínseco, e sua concentração é igual ao número de elétrons presentes na banda de condução ou ao número de lacunas deixadas na banda de valência. Um grande gap entre as bandas significa que será necessária uma maior excitação térmica dos elétrons para a emissão do mesmo da banda de valência para a banda de condução. Sendo assim, o aumento de temperatura aumenta a possibilidade da excitação do elétron na banda de condução, que conseqüentemente aumenta a concentração dos portadores intrínsecos, que influencia diretamente na eficiência da célula solar, pois quanto maior a temperatura, também será maior a quantidade de elétrons livres no material semiconductor para permitir a condução de corrente (Pveducation, 2022). A Figura 2 ilustra a representação da junção PN.

Figura 2 - Representação da Junção PN



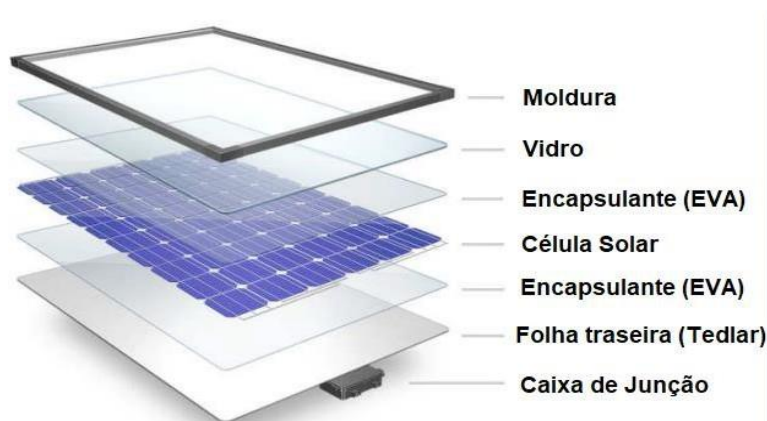
Fonte: Ribeiro, 2016

3.3. CONSTITUIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

De forma geral, a composição dos módulos FV inclui pequenas concentrações de materiais valiosos, como por exemplo a prata que é utilizada para a confecção dos contatos de prata, chamados “fingers”, que se fixam na parte superior do semicondutor para coletar os elétrons que são fotogerados pelo mesmo (De Almeida Prado, 2018), como podemos observar a Figura 3 apresenta uma composição convencional dos módulos FV (Heath *et al.*, 2020).

O processo de composição (de forma genérica) é: primeiramente o vidro temperado é posicionado na frente do módulo (o vidro utilizado é resistente à choques elétricos, impactos por pedras de granizo e de colisões de baixo impacto), em seguida um filme de acetato-vinila de etileno (EVA) é aplicado junto ao vidro e recebem as células fotovoltaicas, em seguida o EVA é novamente aplicado, contudo a parte traseira recebe uma camada de fluoreto de polivinila (este polímero aplicado possui características químicas que reduzem a inflamabilidade do interior do módulo além de ser extremamente resistente à ações de outros produtos químicos, com exceção dos ésteres e cetonas, também possui estabilidade térmica (é comumente chamado de Backsheet ou Tedlar) e em sequência retira-se o ar que reside entre o vidro e o backsheet e aquece-se o módulo a temperaturas acima do ponto de fusão do filme EVA para que o EVA venha derreter e ocupar a lacunas deixadas pelo ar para que venha vedar o módulo FV e por fim os módulos são emoldurados (o frame de alumínio é o mais comum) e vedados com selante de silicone juntamente à caixa de junção com seus respectivos contatos de saída (Strachala *et al.*, 2017).

Figura 3 - Composição convencional de módulo FV



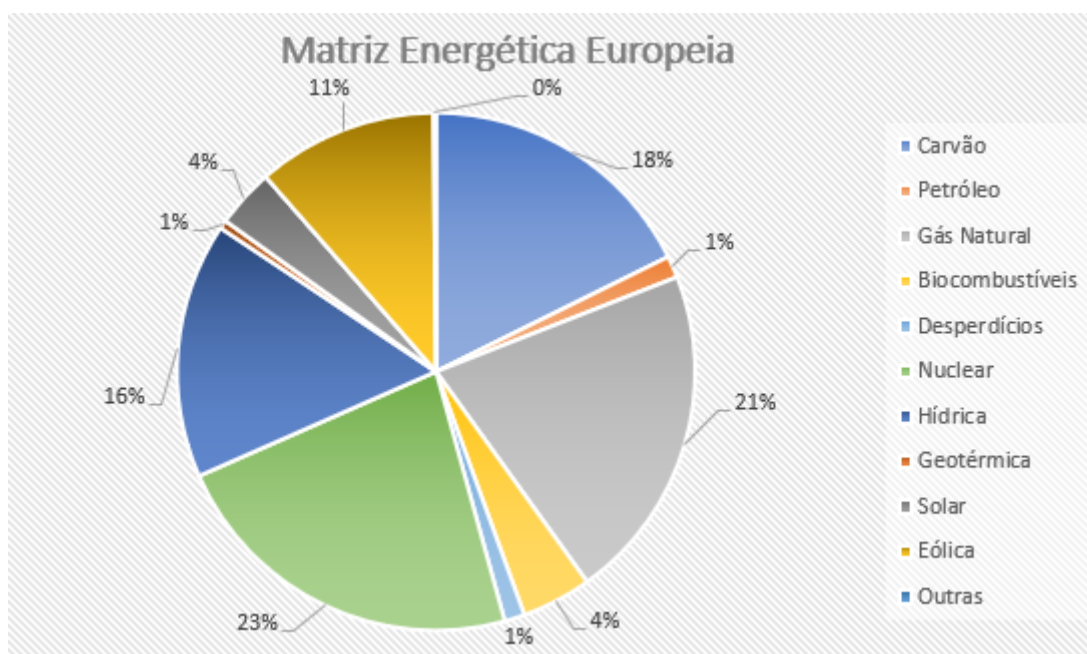
Fonte: Wealthdaily, 2017

4. PRODUÇÃO ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O aumento de consumo de energia elétrica tem sido impulsionado pela mudança das relações industriais e de produção energética e tecnológica, isto é, o avanço industrial têm demandado cada vez mais energia, e não obstante, o avanço tecnológico tem impulsionado o consumo elétrico de forma massiva, de forma para suprir as necessidades energéticas tem sido fundamental a utilização de fontes alternativas para a produção de energia elétrica (Ferreira *et al.*, 2018), a diversificação dos modos de produção de energia elétrica tem crescido expressivamente nas últimas décadas e a produção energética FV tem se mostrado como um promissor potencial para a produção de energia elétrica em grande escala (Curtis *et al.*, 2021).

A figura 4 representa a contribuição de cada fonte de produção energética no ano de 2019 na Europa.

Figura 4 - Contribuição de diferentes fontes de produção de energia elétrica na Europa em 2019



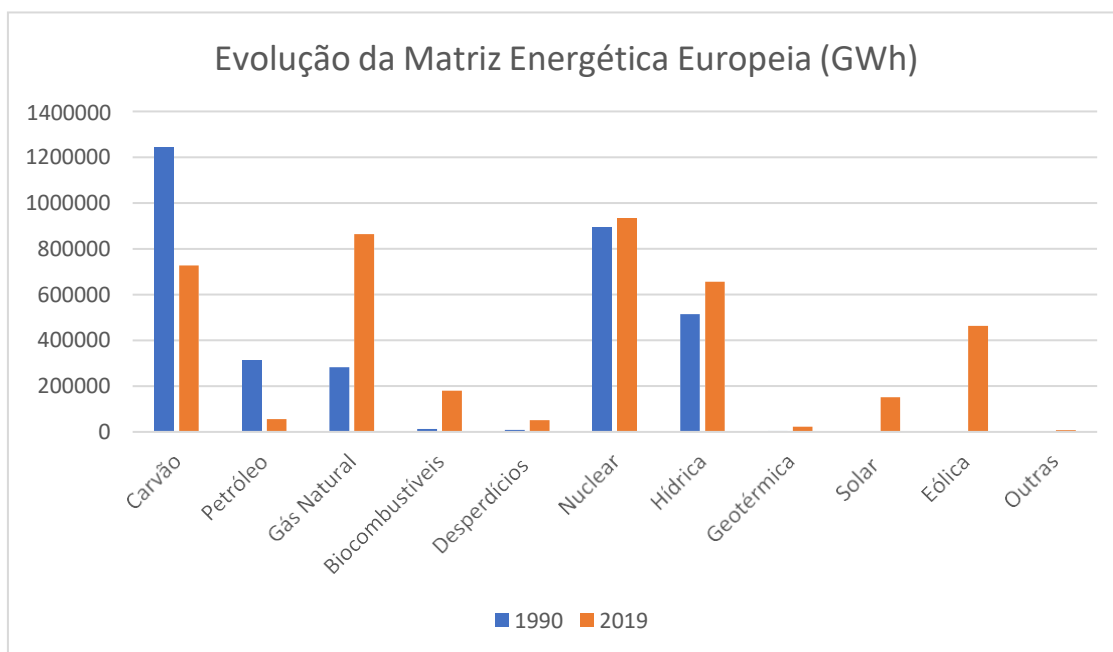
Fonte: IEA, 2022

A partir da figura 4 podemos observar que a matriz energética europeia possui uma diversificação entre as fontes que produzem a energia elétrica no continente no ano de 2019, tendo destaque o carvão (18%), gás natural (21%), nuclear (23%), hídrica

(16%), eólica (11%) e o solar (4%) se tornando um expoente em ascensão com o passar dos anos (IEA, 2022).

A figura 5 traz um comparativo entre a mudança das fontes energéticas entre os anos de 1974 e 2019:

Figura 5 - Comparativo da produção elétrica europeia entre os anos de 1974 e 2020

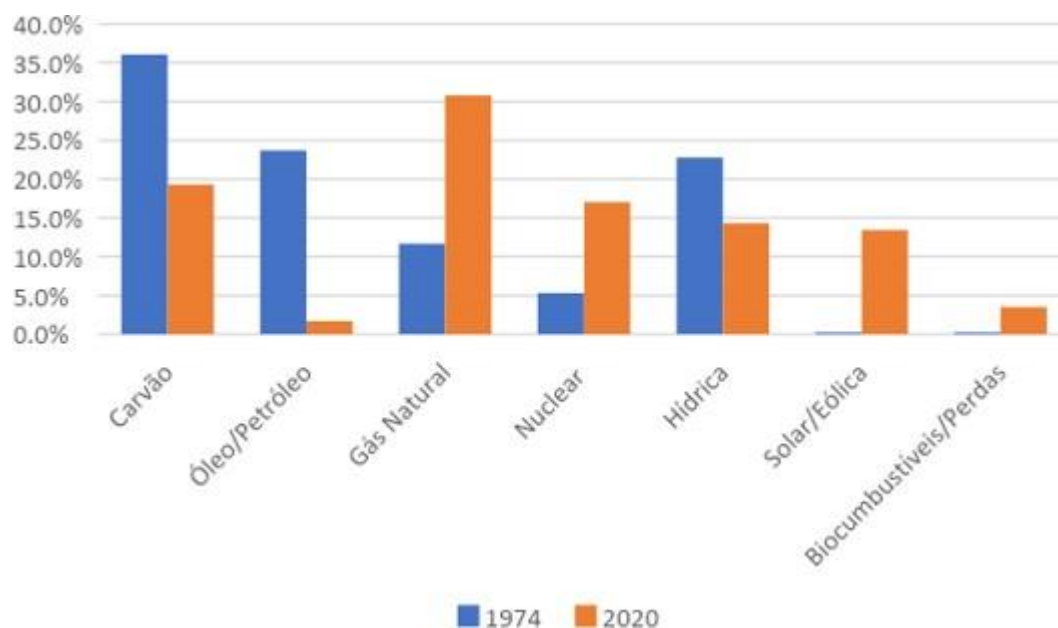


Fonte: IEA, 2022

Conseguimos verificar no decorrer desses 29 anos que as fontes energéticas alternativas têm crescido de forma a atender a demanda elétrica europeia que aumentou de 3.273.563GWh em 1990 para 4.106.730GWh em 2019, necessitando a diversificação da matriz energética de forma a suprir essa demanda e criar uma independência das fontes tradicionais. Podemos destacar o crescimento da fonte eólica que passou de 2% de contribuição na matriz energética europeia em 1974 para 11% de contribuição em 2019 e a energia solar que representava 0% em 1974 e em 2019 atingiu 4% (IEA, 2022).

Entretanto a Figura 6 mostra um comparativo entre a produção energética mundial a partir de diferentes fontes dentre 1974 e 2020, onde podemos ter uma dimensão da real evolução ao longo do tempo, de forma a prospectar o mercado e suas possibilidades com o decorrer dos próximos anos (IEA, 2022).

Figura 6: Comparativo da produção elétrica global entre os anos de 1974 e 2020



Fonte: IEA, 2022

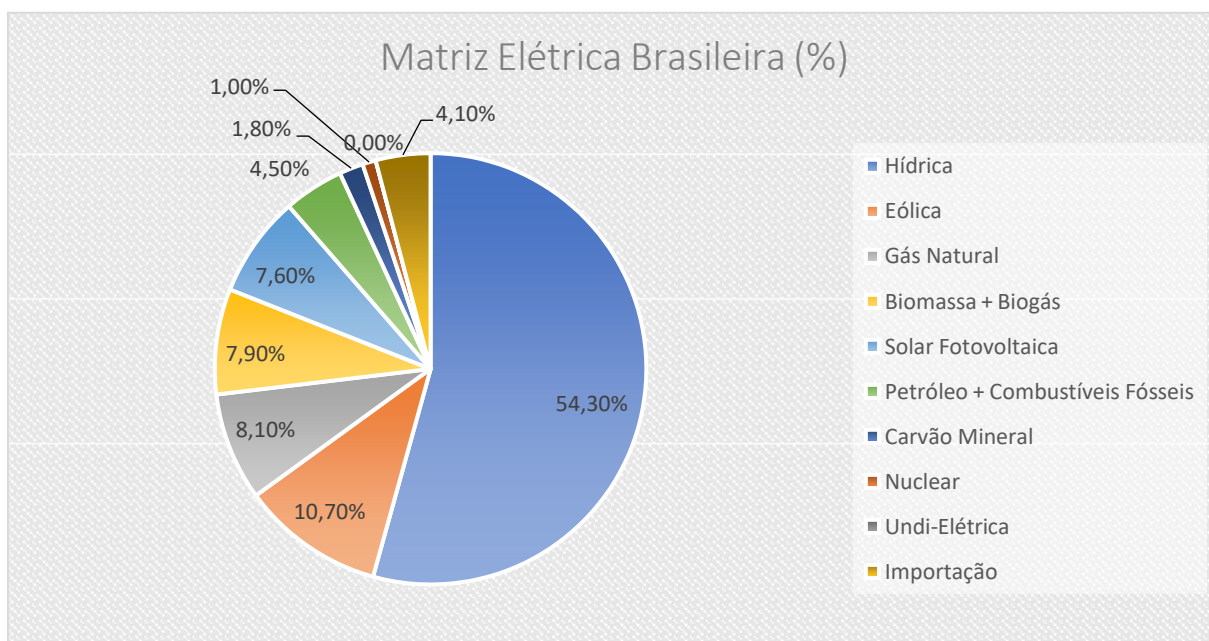
4.1. PRODUÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

No Brasil a matriz elétrica ainda é predominantemente baseada na fonte hídrica, o potencial elétrico é de 193.502MW, com 54,3% da produção originada pela fonte hídrica (IEA, 2022).

Podemos observar que a energia solar é a quinta maior fonte de geração de energia elétrica, representando aproximadamente 7,6% dos 193.502MW de energia. A figura 7 traz a representação percentual de cada fonte de energia (Absolar, 2022).

Dentro da geração distribuída no Brasil, os cinco estados brasileiros que possuem a maior potência instalada e suas respectivas porcentagens de contribuição são: Minas Gerais (1.730,2 MW - 16,8%), São Paulo (1.323,1 – 12,8%), Rio Grande do Sul (1.170,1 – 11,3%), Mato Grosso (690,3 – 6,7%) e Paraná (514,8 – 5,0%) (Absolar, 2022).

Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira

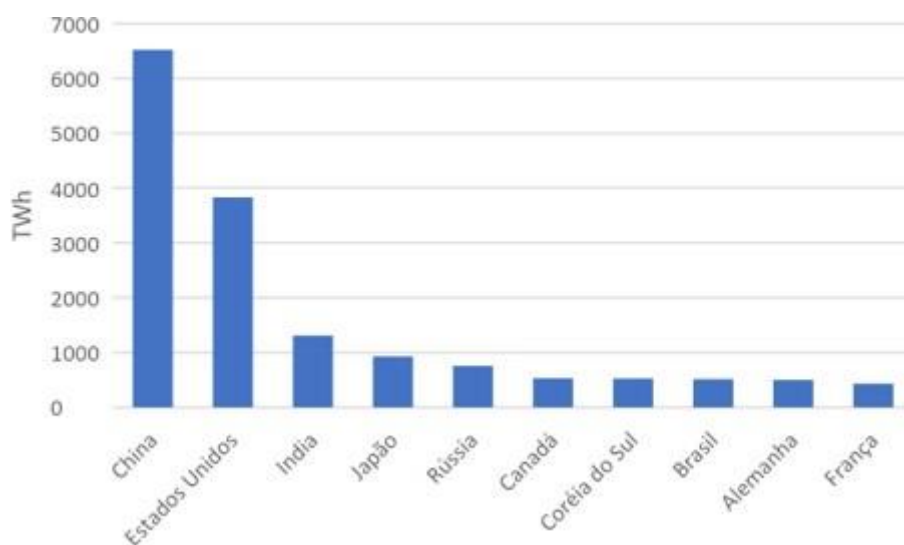


Fonte: Absolar, 2022

O desenvolvimento do mercado tem se direcionado para a transferência da produção que anteriormente era centrada majoritariamente na dependência do carvão, petróleo e recursos hídricos para uma disseminação mais igualitária, porém tendo como base carvão, gás natural e energia nuclear. Todavia, neste período, a energia solar (apresentada na figura 6 juntamente com a energia eólica) foi a fonte que mais se desenvolveu, tendo apresentado um percentual de contribuição de 0,2% em 1974 e de 13,4% em 2020 (IEA, 2020).

Em 2019, o consumo de energia elétrica global atingiu a marca de 22.848 TWh, 1,8% a mais em relação ao ano anterior (IEA, 2020). O crescimento tem demandado uma geração de energia elétrica descentralizada, bem como fomenta a possibilidade da geração de energia elétrica de forma distribuída e diversificada. A associação entre o consumo e a produção de energia elétrica no cenário global mostra a real demanda do mercado juntamente com a possibilidade de expansão das fontes não convencionais de produção de energia elétrica. A Figura 8 apresenta os 10 maiores consumidores de energia elétrica em escala global.

Figura 8 - 10 maiores consumidores de energia elétrica mundial e seu respectivo consumo em 2019



Fonte: IEA, 2022

Observa-se que a China, o país mais populoso do mundo, atualmente possui o maior consumo de energia elétrica mundial, e de igual modo, o país asiático é o que mais produz módulos FV no mundo, cerca de 90% da produção mundial está concentrada na China. Em 2019, a China realizou novas instalações fotovoltaicas de 30,1 GW, totalizando 204,3 GW. (Caijie Liu, Qin Zhang, Hai Wang, 2020).

5. GERAÇÕES DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS

O crescimento e desenvolvimento da tecnologia FV tem se estabelecido e segue projeções crescentes de aumento, com o decorrer dos anos. Em 2015, a capacidade acumulada mundial instalada era de 222 GW (IRENA, 2016), em média o custo de produção FV em relação à potência produzida pelo mesmo é em média \$0,30 – este valor está considerando quaisquer tipos de painéis FV (Jean *et al.*, 2019). Entretanto estima-se que o valor de material recuperado dos módulos solares fotovoltaicos, de forma individual, apresenta o potencial de 60 milhões de dólares em 2030 e de até 2 bilhões de dólares em 2050, o que simboliza um grande retorno financeiro, visto que o custo médio para a reciclagem dos módulos FV em alguns países da Europa chega a atingir 0,70 centavos de dólar por módulo e com índices de reciclagem em torno de 95%, sendo de 70% à 95% a taxa de adesão dos itens para usos terceiros (Curtis *et*

al., 2021). No quadro 1, podemos ter um panorama dos tipos de FV, exemplos e suas diferenças:

Quadro 1 - Gerações de FV e suas principais características

Geração	Tipos de Módulos (Exemplos)	Características
1ª Geração	Silício Monocristalino; Silício Multicristalino; Fita de Silício	Tecnologia mais disseminada entre os módulos. Possui os maiores índices de eficiência, porém é o tipo de módulo mais caro. Possui vida útil média maior que os demais. Sua eficiência média é de 20%
2ª Geração	Silício Amorfo; Junção entre silício amorfo e micromorfo; Telureto de cádmio; Seleneto de Cobre, Índio e Gálio	Tecnologia mais barata de comercialização em massa, possui possibilidade de flexibilização e o desempenho perante sombreamento é menos afetado. Sua eficiência é em média 10%.
3ª Geração	Painéis FV Orgânicos; Filmes finos avançados	Tecnologia emergente que busca unir a melhor tecnologia possível a melhor custo benefício. Sua eficiência média é de 20%

Fonte: Latunussa *et al.*, 2016

5.1. RESÍDUOS DOS MÓDULOS FV E SEU DESPERDÍCIO

A substituição de componentes internos dos módulos FV, visando a prevenção de futuras falhas elétricas, tem se mostrado uma alternativa viável para evitar descarte precoce dos módulos FV (Xu *et al.*, 2018). A substituição de componentes que compõem os módulos FV podem evitar significativamente as falhas de meia-vida

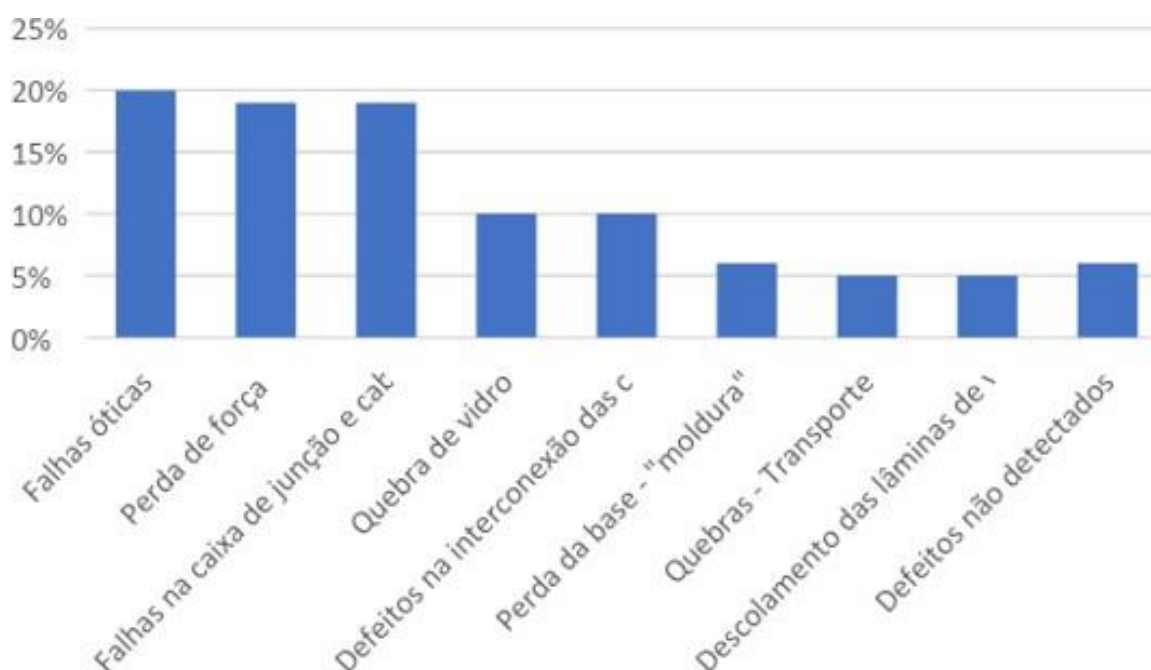
(ocorrem de 5 até os 12 anos de uso) bem como as falhas de fim de vida do FV (a partir dos 13 anos de uso), visto que um componente em não conformidade pode afetar todo o conjunto de módulos instalados e prejudicar a eficiência do sistema como um todo (IRENA, 2016). Outra medida simples, porém efetiva para evitar as falhas instantâneas (que ocorrem do momento do transporte até os 4 anos de uso), é o cuidado no momento de transporte e instalação dos módulos FV, visto que as perdas consequentes de impactos mecânicos podem representar até 6% dentre as perdas totais dos FV.

As falhas de meia-vida mais observadas pelos consumidores são as mudanças abruptas de temperatura, falhas nos contatos da caixa de junção, quebra de vidro e defeitos dos diodos de desvio (IRENA, 2016). O reparo dos componentes também pode aumentar a energia de saída dos módulos FV mais antigos (Xu *et al.*, 2018).

O tempo de vida útil de um módulo solar fotovoltaico é de, aproximadamente, 30 anos (IRENA, 2016), com o decorrer do tempo, falhas e degradações começam a impactar em seu desempenho e, conseqüentemente, acarretam no fim de sua vida útil, tornando-se assim um potencial material para descarte em massa. Cada tipo de módulo solar, possui uma composição específica, apresentando potencial de readaptação, reutilização de seus materiais para diferentes usos ou até mesmo para a concepção de matéria prima reutilizada em outro módulo FV, avaliando-se a pertinência do respectivo material e suas propriedades. Os principais metais encontrados nos módulos FV são: Alumínio (Al), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Arsênio (As), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cádmio (Cd), Ferro (Fe), Selênio (Se), Estanho (Sn), Zinco (Zn), Antimônio (Sb), Telúrio (Te), Prata (Ag), Gálio (Ga), Índio (In), Molibdênio (Mo) e Níquel (Ni) (Tammaro *et al.*, 2015).

Assim como qualquer material elétrico, os módulos FV estão sujeitos a falhas/inconformidades em seu desempenho, a Figura 9 apresenta as falhas observadas e relatadas pelos consumidores de FV (IRENA, 2016):

Figura 9 - Percentual de falhas observadas em módulos solares fotovoltaicos a partir de relatos de consumidores



Fonte: IRENA, 2016

De forma geral, composição dos módulos FV envolvem substâncias/elementos tóxicos ou que apresentam perigo em seu manuseio em sua constituição: vidro, alumínio, chumbo, cádmio, dentre outros. Sua constituição também conta com outros materiais de interesse comercial como: gálio, prata, silício, cobre etc. Evidentemente, cada tipo de módulo FV possui uma distribuição respectiva de composição dos materiais citados.

Atualmente, o mercado FV mundial busca reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência energética, desta forma, 92% dos FV instalados mundialmente são módulos de 1ª geração, tanto silício monocristalino como policristalino (Energia 3S, 2022), em que 90% de sua massa era composta por vidro e alumínio, materiais que podem ser classificados como não perigosos, porém os materiais de menor quantidade como: silício, prata, chumbo e estanho, que representam cerca de 4% da composição do c-Si, apresentam dificuldade de reaproveitamento devido seu risco. (IRENA, 2016)

A reciclagem dos materiais existentes nos módulos FV ainda enfrenta certas dificuldades (Curtis *et al.*, 2021) que retardam o pleno avanço no processo de reaproveitamento dos materiais como:

- Variedade de leis e regulamentações – Na maioria dos países, as leis existentes aplicáveis para a reciclagem ainda são abrangentes e complexas, em muitos casos, não há leis/regulamentação locais específicas para lidar com a reciclagem do material em específico (Ferreira et al., 2018), em contrapartida, na União Européia, os módulos fotovoltaicos foram classificados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) desde 2012, sendo obrigação dos fornecedores, importadores, fabricantes e revendedores a logística reversa. Em Bruxelas, a organização sem fins lucrativos PV CYCLE iniciou de maneira voluntária sua operação para coleta e gerenciamento dos resíduos (De Almeida Prado, 2018).
- Falta de incentivo econômico para fomentar a reciclagem dos módulos (Curtis et al., 2021).
- Falta de conhecimento específico na área – Os estudos limitados para embasar as técnicas necessárias para separação dos materiais afim de reutilizá-los posteriormente ainda são um fator impeditivo crucial, muitas vezes ligado à falta de incentivo governamental para o desenvolvimento de pesquisas (Curtis et al., 2021).

Atualmente, o Brasil não possui legislação específica para o tratamento dos módulos solares FV em fim de vida útil. O manuseio, descarte e reciclagem dos mesmos ficam sob jurisdição da lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos que altera a lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, não contemplando os rejeitos radioativos, que possuem regulamentação específica. A lei tem como objetivo orientar pessoas físicas e jurídicas, bem como estabelecer padrões e diretrizes no tocante aos descartes, não reaproveitamento dos resíduos sólidos de forma geral. Entretanto o maior atrativo e fator crucial para incentivo da implementação desta fonte de geração de energia limpa é a isenção de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) e a redução do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) para 0%, com validade até 31 de dezembro de 2021 (Ferreira *et al.*, 2018).

6. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho adotou as seguintes etapas: pesquisa de artigos científicos, publicações em revistas e periódicos, de técnicas de reciclagem de módulos fotovoltaicos, através da utilização do Google Scholar.

A partir dos resultados obtidos, o período de pesquisa foi limitado para abranger publicações de 2015 até o presente momento. Após a limitação temporal, também se analisou as principais citações dentro do material selecionado para apuração de procedimentos com uma descrição detalhada em artigos mais antigos. A pesquisa utilizou as palavras-chave: photovoltaic modules, recycling, reuse e solar panels para realizar a busca. Após determinação do tempo de pesquisa, também foram observados os artigos que se utilizavam de técnicas com riqueza em detalhes e que já apresentavam resultados preliminares, desta forma, o campo de pesquisa foi restrito de forma a focar no tema de estudo proposto.

Os aspectos que nortearam a busca pelo referencial teórico foram: quais técnicas têm sido estudadas e seus princípios? Quais resultados parciais obtidos? É possível uma aplicação em larga escala? Quais são seus impactos econômicos e ambientais?

7. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FV

Através de procedimentos experimentais, as células fotovoltaicas são imersas em um banho ultrassônico, de forma com que a solução venha se auto aquecer a 40°C, possibilitando melhores condições para a lixiviação dos componentes metálicos encontrados em sua composição, geralmente, trata-se da prata, alumínio e do cobre (Yi *et al.*, 2014), contudo sob uma análise econômica o silício puro ainda é o material mais visado nos módulos FV em fim de vida útil, considerando a escassez do produto bem como seu valor econômico, outros materiais tem se destacado como potenciais insumos para reutilização como vidro, prata e alumínio, entretanto, tais materiais se encontram em quantidades significativamente menores do que o silício (Tao e Yu, 2015).

Atualmente, o mundo ainda se encontra desenvolvendo métodos e formas de reaproveitamento dos materiais que compõem os módulos FV de forma específica, não tendo assim, metodologia consolidada a ser seguida para a reciclagem dos componentes dos módulos FV. Sendo assim, de forma genérica, existem etapas do processo de reciclagem dos materiais constituintes dos módulos FV (Yi *et al.*, 2014):

- Módulos quebrados: Corte/Quebra do módulo → processo térmico → separação → lixiviação → Tratamento químico/Refino → 99,9% silício
- Módulos inteiros: Processo térmico → Separação → tratamento químico/cauterização → refino → Reutilização do módulo

Contudo, os processos citados acima tratam-se de formas genéricas de tratamento dos módulos FV em fim de vida útil. Entretanto, diferentes métodos, ainda experimentais, estão sendo estudados para a abordagem e tentativa de recuperação de materiais específicos contidos nos módulos FV (Dias *et al.*, 2016), como por exemplo:

Quadro 2 - Técnicas experimentais de reciclagem

Material a ser recuperado:	Técnica Experimental:
Silício	Pirólise em forno de correia transportadora e pirólise em reator de leito fluidizado (Frisson <i>et al.</i> , 2000) Remoção do alumínio de revestimento por condicionamento usando 30% de KOH (Radziemska e Ostrowsk, 2010) Lixivação com mistura de 250ml de HNO ₃ (65%), 150ml de HF (40%) e 150ml de CH ₃ COOH (99,5%) para remoção de revestimentos de Ag (Radziemska e Ostrowsk, 2010)
Vidro e Silício	Recuperação através da utilização de solventes orgânicos (Kang <i>et al.</i> , 2012); Decomposição térmica para a remoção da camada adesiva e subsequentemente a recuperação dos semicondutores (Kang <i>et al.</i> 2012)
Vidro, Silício e Cobre:	Aquecimento de módulos FV para delaminação térmica (Wang <i>et al.</i> , 2012) Condicionamento em ácido visando a remoção do revestimento estanho-chumbo do cobre e das impurezas metálicas da camada de silício (Wang <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: Dias *et al.*, 2016

Estudos recentes analisaram diferentes técnicas de reciclagem dos módulos fotovoltaicos ambiental levando em conta as consequências da extração de matéria prima. De acordo com Strachala *et al.*, (2017) de forma geral três métodos de reciclagem podem ser usados: químico, térmico e mecânico.

Para que haja possibilidade da reciclagem, independente de qual método empregado, é necessário o conhecimento da composição do mesmo. O alumínio e o vidro representam cerca de 90% do peso do módulo FV contudo ainda existem materiais que valem a pena sua reciclagem. Podemos analisar as matérias primas que são possíveis de reciclagem (Strachala *et al.*, 2017):

- Vidro – Sendo um dos principais materiais presentes nos módulos FV, o vidro chega representar quase 70% do peso da composição dos módulos FV, sua

reciclagem pode reduzir o consumo de energia necessário para sua produção em cerca de 40%, podendo ser utilizado para novos módulos FV.

- Alumínio – O material que constitui cerca de 20% do peso dos módulos FV possui demanda de energia elevada para sua produção, cerca de 200MJ de eletricidade para cada kg produzido, que representa aproximadamente 8% da energia necessária para a produção dos módulos FV, contudo o alumínio pode ser reciclado com maior facilidade do que os demais materiais presentes no módulo.
- Componentes plásticos – Sua degradação devido às intempéries climáticas causa dificuldade de reciclagem, contudo sua energia térmica ainda pode ser aproveitada nos processos de combustão.
- Metais pesados – Os metais pesados podem ser considerados insignificantes em termos de peso ou consumo de energia para produção de módulos FV, contudo ainda se encontram presentes nos módulos. Prata, chumbo, estanho e cobre são os metais mais encontrados, e sua necessidade de reciclagem difere em relação aos demais componentes: metais pesados são danosos ao meio ambiente devido sua toxicidade.

7.1. RECICLAGEM QUÍMICA

- Para a realização da reciclagem química selecionou-se módulos monocristalinos danificados. Realizou-se a separação do módulo na ordem específica: metalização frontal, metalização traseira, camadas antirreflexo e junção PN. A técnica experimental tinha como principal problema a escolha correta de cada composto, sua respectiva concentração e temperatura para procedimento químico, então adotou-se o seguinte experimento: imersão da célula em ácido nítrico (HNO₃), em seguida em ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 100°C, hidróxido de potássio (KOH) a 48°C e por fim é enxaguado em água (Strachala et al., 2017).
- A partir dos processos químicos, foi possível remover os componentes da célula FV danificada, entretanto a eficácia foi insuficiente devido ao tempo longo de ação do decapante e também ao alto custo monetário dos solventes

utilizados. O tratamento químico demandou aproximadamente 20 minutos, o que prejudicaria uma aplicação em larga escala (Strachala et al., 2017).

- A partir de módulos danificados, foi aplicado banho químico do objeto em ácido sulfúrico e em ácido clorídrico para se observar os resultados obtidos. A ineficácia foi determinada uma vez que seria necessário grandes quantidades de ácido para emergir os módulos danificados, ou para que se utilizasse uma quantidade menor da solução, seria necessária a aplicação de reciclagem mecânica para triturar o módulo fotovoltaico. Concomitantemente, os ácidos se mostraram ineficazes para a dissolução da prata, devido à formação de sais insolúveis de sulfato de prata. Entretanto, o frame de alumínio dos módulos pode ser totalmente dissolvidos em NaOH após a lixiviação ácida (Yi et al., 2014).
- O tratamento químico ainda foi aplicado através da ação de HNO₃ para extração da prata, KOH para extração e remoção de todos os revestimentos de alumínio e em seguida a aplicação combinada de HNO₃, HF, ácido etanóico e Br para remoção da camada antirreflexiva presente nos módulos fotovoltaicos. Para seguimento do processo de reciclagem ainda foi necessária a ação de um processo térmico para complemento do processo completo: o painel foi depositado em um forno a 480°C e as camadas do módulo puderam ser separadas (Padoan *et al.*, 2019)

7.2. RECICLAGEM TÉRMICA

- Para esta técnica existem diversos métodos que se utilizam do princípio térmico, dentre métodos universais e também métodos para módulos FV específicos, na maioria dos casos em que a técnica foi aplicada, o resultado obtido foi a obtenção da matéria-prima. Os módulos foram encapsulados hermeticamente por EVA, para proteção contra condições climáticas e danos mecânicos. O material de copolímero EVA encobriu ambos os lados da célula FV, enquanto a frente do módulo foi coberta por vidro (Strachala et al., 2017).
- Uma análise termográfica (análise que analisa de forma quantitativa a amostra de peso da amostra) foi realizada no início do experimento. De acordo com Strachala et al., (2017) em um arranjo estático, o peso instantâneo w de um

objeto é medido em função do tempo t e temperatura constante (técnica isotérmica), de acordo com a função apresentada na equação 2:

$$w = f(t)T = \text{constante} \quad (2)$$

Onde:

w – Peso instantâneo

t – Tempo

T – Temperatura

- O resultado obtido foi uma curva termográfica que indicou a temperatura e tempo como variáveis que influenciavam o peso instantâneo da amostra. As temperaturas de decomposição de todos os materiais plásticos foi de 445,44°C e também uma taxa de aquecimento com temperatura máxima de 479,22°C (o módulo sofreu o aquecimento em um forno especial, específico para tal). A técnica para aquecimento da amostra foi aproximadamente 20°C por minuto, o módulo permaneceu no forno por 25 minutos, tendo os materiais plásticos evaporados, sobrando assim a célula FV e o vidro, que foram separados (Strachala et al., 2017).
- A duração não utilizou solventes, que possuem custo elevado, além de possuírem o tempo significativamente menor, em contrapartida, a desvantagem deste tipo de reciclagem é a formação e emissão de gases durante o processo de aquecimento. Cerca de 85% das células podem ser reaproveitadas e consequentemente reduzir o consumo de energia (designado para fabricação de novos módulos) em até 70%, o que torna o método comercialmente viável devido seu baixo custo e alta efetividade (Strachala et al., 2017).
- A inserção de módulos danificados em um forno tubular a aproximadamente 500°C também foi sugerida através de sua decomposição pirolítica de EVA em uma atmosfera inerte também foi observada, necessitando de um tempo de inserção entre 30 minutos a 1 hora, foi suficiente para a decomposição completa do módulo. Entretanto, o tempo necessário ainda exige custos inerentes muito grandes para o retorno obtido (Deng et al., 2019).
- Um tratamento térmico de delaminação se mostra eficaz utilizando-se de altas temperaturas para alterar as características dos módulos fotovoltaicos e realizar a decomposição do EVA, permitindo a separação entre o vidro e a célula de silício (Padoan et al., 2019).

- Outra técnica dentro do tratamento térmico é a inserção do módulo inteiro dentro de um forno sob atmosfera de nitrogênio a 450°C, entretanto, as células recuperadas perdem sua eficiência, necessitando uma limpeza antes de sua reutilização (Frisson *et al.*, 2000).
- Dentre as técnicas, ainda cita-se o aquecimento dos módulos FV em um forno sob duas etapas: primeiro aquecimento até 330°C para separação do Backsheet do módulo. Em seguida, um segundo aquecimento até 400°C para a queima do EVA e em seguida recuperar o vidro e as células (Wang *et al.*, 2012).

7.3. RECICLAGEM MECÂNICA

- Para o processo de reciclagem mecânica, os módulos FV são colocados em um triturador e após retalhado em pedaços de aproximadamente 5mm. Após isso, o vidro é separado dos pedaços do filme laminado, em seguida o vidro separado é lavado (Strachala *et al.*, 2017).
- Atualmente, a combinação entre os processos mecânicos e térmicos tem prospecções de melhores resultados, permitindo a possibilidade de reciclagem de módulos cristalinos e película fina e também para a obtenção de materiais mais valiosos (Strachala *et al.*, 2017).
- Os cacos de vidros provenientes da trituração são utilizados para substituir o material original em vidro, reduzindo a demanda energética para a produção, além da redução de CO₂ derivados aos processos de fusão e reduzir os combustíveis necessários para a produção do vidro. Supõe-se que todos os materiais plásticos sejam incinerados (Strachala *et al.*, 2017).
- De semelhante modo, estudos preliminares, também utilizando a técnica de reciclagem mecânica, através do esmagamento de módulos fotovoltaicos já comprometidos e em seguida submetidas ao processo de lixiviação ainda se mostraram parcialmente ineficazes, uma vez que o objetivo da recuperação eram os materiais metálicos, que possuem alto valor de mercado, presentes na composição dos módulos. De tal forma que ainda seria necessária a atuação da reciclagem química, através de um banho ultrassônico de kodo (Yi *et al.*, 2014).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste trabalho foi verificado que o consumo energético mundial tem aumentado gradativamente com o passar dos anos, alterando assim a relação de produção e consumo energético ao redor do mundo, fazendo-se assim necessária a diversificação da matriz energética para que se possa atender a demanda e não depender apenas da produção elétrica através das fontes energéticas convencionais, tendo prospecções ainda mais de aumentos com o passar dos anos.

O aumento do consumo faz com que também seja necessário o aumento de fontes alternativas de geração, sendo a de maior destaque a energia solar fotovoltaica. Conseqüentemente, faz-se cada vez mais necessário a produção em larga escala de módulos solares fotovoltaicos, estruturas e cabos. Sabendo que os módulos possuem uma vida útil de 25 a 30 anos, após este período temos a prospecção de um acúmulo exorbitante de resíduos provenientes do fim de vida útil, gerando lixos eletrônicos que não possuem destinos para reaproveitamento de seus componentes. Hoje já temos um grande volume de desperdício de componentes que poderiam ser utilizados para a produção de novos módulos fotovoltaicos quanto para demais aplicações conforme a necessidade de quem está realizando o processo de reciclagem, visando reduzir os impactos ambientais consequentes da não reciclagem dos resíduos provenientes dos módulos.

Pelo aspecto político-econômico, ainda é necessário o fomento de leis que incentivem estudos a fim de desenvolver técnicas confiáveis e consolidadas de reciclagem dos módulos fotovoltaicos bem como seus componentes, a exemplo da união europeia que tem sido pioneira dentro deste âmbito.

Nos dias atuais, destacando apenas o aspecto econômico, a alternativa mais viável para sistemas fotovoltaicos antigos é a substituição dos módulos já instalados por módulos fotovoltaicos mais modernos, os quais possuem tecnologia mais recente e maior eficiência (além de atualmente termos módulos com maior potência, possibilitando uma maior produção energética considerando um espaço menor para a instalação do sistema fotovoltaico) gerando assim ainda mais volume de módulos descartados

Atualmente, existem técnicas experimentais que se encontram em fase de desenvolvimento e pesquisa de reciclagem dos módulos FV, dentro das técnicas de reciclagem, por mais que utilizem-se de um princípio específico, a aplicação visando

a recuperação de um material específico ainda se encontra em fase de pesquisa, portanto, estes métodos ainda não consolidaram, contudo, pode-se verificar que é possível reaproveitar estes componentes, entretanto, há uma necessidade de aprimoramento de técnica de reciclagem, que implicará diretamente com a economia de recursos monetários e energéticos que se destinariam para a produção de novos componentes, tornando-se assim uma necessidade que tem crescido na sociedade ao passo que o consumo energético aumenta bem como a produção elétrica através de fontes não convencionais (como a produção através da energia hidráulica, principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil).

9. TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, todas as técnicas de reciclagem apresentadas ainda se encontram em fase experimental. Desta forma ainda é necessário que se realize uma amostragem maior de para validar e eficiência dos modelos de reciclagem dos módulos.

Ainda é necessário expandir as possibilidades de reciclagem através do fomento aos estudos específicos nesta área para avaliar a possibilidade de novas técnicas que possam ser mais eficientes na recuperação dos módulos.

Futuramente, faz-se necessário a realização da réplica das metodologias para comparação de resultados e levantamento de informações mais detalhadas do processo utilizado além do monitoramento do desempenho de módulos fotovoltaicos que utilizam insumos reciclados.

REFERÊNCIAS

Absolar.org Infográfico Mercado. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> Acesso em: 20 mai. 2022.

CURTIS, T, L. *et al.* **A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations**, 2021.

HEATH, A., G. *et al.* **A. Research and Development Priorities for Silicon Photovoltaic Module Recycling to Support a Circular Economy**, 2020.

IRENA. **End-Of-Life Management Solar Photovoltaic Panels**, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, 2014. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB

YANG, M., KIM, J., D., ALEXE, M. **Flexo-photovoltaic effect**, 2018.

Bluesol Efeito Fotoelétrico e Efeito Fotovoltaico, 2022. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoeletrico-fotovoltaico/>. Acesso em: 20 mai. 2022.

PVEDUCATION.ORG – PN JUNCTIONS, 2022. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/doping>. Acesso em: 06 jun. 2022

RIBEIRO, THIAGO DE OLIVEIRA. IFMG. **Apostila para disciplina de eletrônica geral**, 2016

DE ALMEIDA PRADO, PEDRO FORASTIERI. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de materiais**, 2018

Strachala, D. *et al.* **Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction**, 2017.

Wealthdaily., **Special Report: Solar Technology**. Wealthdaily, 2022, Disponível em: <http://www.wealthdaily.com/report/solar-technology/1409>. Acesso em: 15 jun. 2022.

FERREIRA, A. *et al.* **Economic Overview of the use and Production of Photovoltaic Solar Energy in Brazil**, 2018

IEA.ORG ELECTRICITY PRODUCTION. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-production>. Acesso em: 08 abr. 2022.

IEA.ORG ELECTRICITY INFORMATION. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption#abstract>. Acesso em: 08 abr. 2022.

IEA.ORG. DATA AND STATISTICS, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WEOEUR&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>. Acesso em: 16 jun. 2022.

WANG, H., ZHANG, Q., LIU, C., **Cost-benefit Analysis of Waste Photovoltaic Module Recycling in China**, 2020

JEAN, J., WOODHOUSE, M., BULOVIC, V. **Accelerating Photovoltaic Market Entry with Module Replacement**, 2019

CURTIS, T. *et al.*, **Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives**, 2021

LATUNUSSA, C. *et al.* **Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels**, 2016

XU, Y. *et al* **Global Status of recycling waste solar panels: A review**, 2018

TAMMARO, M., RIMAURO, J., FIANDRA, V., SALLUZZO, A. **Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes**, 2015

PAN, A. ENERGIA3S.COM.BR EVOLUÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES. 2022. Disponível em: <https://energia3s.com.br/2021/06/19/a-evolucao-das-celulas-solares-1a-2a-e-3a-geracao/>. Acesso em: 08 abr. 2022

PADOAN, F. C. S. M. *et al.*, **Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development**, 2019

YI, Y. *et al.* **Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules**, 2014

TAO, J., YU, S. **Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules**, 2015. *Sol Energ Mat Sol C.* 141, 108–124

DIAS, P. *et al.*, **Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules**, 2016

FRISSON, L. *et al.*, **Recent improvements in industrial PV module recycling**. In: **16th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 1–5 May 2000, Glasgow, UK.

RADZIEMSKA, E.K., OSTROWSKI, P. **Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules**, 2010. *Renew. Energy* 35, 1751–1759

KANG, S. *et al.* **Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules**, 2012.

WANG, RUIXUE. ZHENMING, XU. **Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review**, 2014.

DENG, R. *et al.* **A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling**, 2019.

RIBEIRO, THIAGO. ELETRÔNICA GERAL 1, 2021. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico Acesso em: 25 jun. 2022

BALFOUR, J. **PV Plant Repowering, the Utility 50-Year Systems Model:** Renewable Energy, 2017

BEETZ, B. **The Sustainability Game Changers:** PV Magazine, 2019

CORCELLI, F., M. RIPA, AND S. ULGIATI. “**End-of-Life Treatment of Crystalline Silicon Photovoltaic Panels. An Energy-Based Case Study.**” Journal of Cleaner Production 161, 2017

MARCELLE, N., MASSIMO, T. **Are renewable energy subsidies effective? Evidence from Europe,** 2016.

CHOI, J. FTHENAKIS, V. **Economic Feasibility of Recycling Photovoltaic Modules Survey and Model,** 2010.

ARAM, T. *et al.* **Solar panels and photovoltaic materials.** London, United Kingdom. IntechOpen, 2018.