



CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

MARCO ANTÔNIO POMPÍLIO DINIZ

**Descarte de Painéis Solares no Contexto de Consolidação do Mercado
Fotovoltaico Brasileiro e Mundial**

Recife

2023

Marco Antônio Pompílio Diniz

**Descarte de Painéis Solares no Contexto de Consolidação do Mercado
Fotovoltaico Brasileiro e Mundial**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energia pelo Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Energia.

Orientadora: Prof. Dr^a. Olga de Castro Vilela

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Diniz, Marco Antônio Pompílio.

Descarte de painéis solares no contexto de consolidação do mercado
fotovoltaico brasileiro e mundial / Marco Antônio Pompílio Diniz. - Recife, 2023.
47 : il.

Orientador(a): Olga de Castro Vilela

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Energia Solar. 2. Módulos Fotovoltaicos. 3. Impactos Ambientais. 4.
Reciclagem. 5. Sustentabilidade. I. Vilela, Olga de Castro. (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

Marco Antônio Pompílio Diniz

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Recife, 17 de maio de 2023

Marco Antônio Pompílio Diniz

Aluno

Profª Drª. Olga de Castro Vilela

Orientadora

Recife

2023

Dedico este trabalho ao meu avô Leandro Genu, o qual sua ausência nas comemorações de conclusão será sentida, e ao meu avô Gilberto Pompílio o modelo de engenheiro que todos os estudantes deveriam ter.

Agradecimentos

Com o final de cada ciclo vem todas as pessoas que o compõem, as que vieram e permaneceram e as que estiveram de passagem. No entanto, não importa o tempo, todos significaram e ensinaram coisas valiosas, dos mais diferentes conteúdos e formas. A estas pessoas eu expresso aqui meus agradecimentos:

Aos meus pais, todos os 4, que ao longo de toda minha vida estiveram ao meu lado, me ensinando e me incentivando a cada passo meu. Seja sobre ciência e o estudo, ou sobre a vida, as chamadas *soft skills*, sou eternamente grato por tudo, pois vocês construíram a pessoa que sou hoje, e essa conquista é tão de vocês como é minha. E juntamente a esses, não posso me esquecer da minha “outra mãe” Adriana Cosmo, que esteve comigo desde os meus primeiros dias de vida até os dias atuais, convivendo e cuidando de mim toda semana.

Aos meus incontáveis familiares que permaneceram interessados e incentivando às minhas conquistas: meus avós, tios, tias, e primos os quais são muitos para citar aqui por nome, mas que desejo que saibam o quanto foram importantes nessa caminhada, e que o apoio de vocês a cada “como está a faculdade?” não passou despercebido, sou, portanto, muito grato por todo esse suporte.

Às pessoas que estiveram comigo ao longo da construção desse trabalho, tendo o otimismo que eu não tinha em mim mesmo, e me mantendo de pé durante todo o processo, me auxiliando com ideias, confiança e tantas formas mais. Em especial, registro meus insuficientes agradecimentos à Tarsila Duarte por ter dado a faísca necessária pra começar a escrever, à Raissa Santana, que esteve sempre comigo pelo tanto que eu me lembro, e para a minha “quase coorientadora” Laísa “Lala” Souza, por ter sido essa rocha que eu precisava para esse projeto.

À minha professora e orientadora Olga de Castro Vilela, nunca será bastante todos os “obrigados”, pois não existem palavras para agradecer sua paciência, atenção e incentivo. Agradeço por ter aceitado encarar essa pesquisa um pouco caótica com curto tempo, pelos ensinamentos e observações ao longo do projeto, mas também por todos os ensinamentos em sala de aula, não só pelo conhecimento, mas pelo desenvolvimento pessoal proporcionado, e pela paixão repassada pela energia solar. Foi um privilégio ter conhecido e aprendido tanto com você.

A todo o grupo de vôlei da Universidade Federal de Pernambuco, em específico a Guilherme Manguiera, o qual tive o prazer de participar durante tanto tempo do meu período na UFPE, pode não ser claro para alguns, mas são incontáveis os benefícios de ter feito parte desse grupo maravilhoso. Foi não só a minha válvula de escape dos assuntos mais sérios, sejam acadêmicos ou de vida pessoal, como também uma forma de me sentir mais imerso na universidade, e realmente vestir a camisa da UFPE, incentivando com isso o propósito acadêmico também. Além desses momentos e emoções, foi também um local onde aprendi muito sobre mim mesmo, pude desenvolver mais habilidades de liderança, resiliência, persistência e autoconfiança, aprendizados que levarei por toda a vida.

Aos meus amigos da empresa Jr. BENS Soluções Sustentáveis, pelas descobertas sobre a vida e os sonhos que se realizam, inclusive este trabalho. Por ter me oferecido a chance de conhecer pela primeira vez um ambiente empresarial, ter me descoberto na área de gestão e auxiliado no conhecimento de perfil do mercado de trabalho, e do planejamento de meu futuro profissional. Destacando aqui o eterno super time fox de Gestão de Pessoas: Samantha Coiado, Estela Maris, Nathália Maria, Crislayne Berto e Camila Félix por terem compartilhado comigo toda essa experiência mais de perto.

Por fim, agradeço profundamente a todo o corpo docente e funcionários do Departamento de Energia Nuclear e do Centro de Energias Renováveis da Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao professor Emmanuel Dutra, por todos os incentivos e ensinamentos nas visitas técnicas, em sala de aula, e em ter me proporcionado a oportunidade de uma Iniciação Científica.

*Nós sabemos o que somos, mas não
o que seremos". (Shakespeare,
Hamlet, Ato IV, Cena V)*

RESUMO

Nos últimos anos, pode-se notar um crescimento exponencial da energia solar no mercado, com um número cada vez maior de painéis fotovoltaicos no cenário urbano e uma participação crescente da geração de solar na matriz elétrica brasileira. No entanto, apesar de ser uma fonte renovável de geração de energia, a geração fotovoltaica ainda é capaz de gerar impactos ambientais, em cerca de 32 formas diferentes, e, no que esse aspecto da tecnologia é dificilmente comentado frente a seu potencial de sustentabilidade, o crescimento acentuado do mercado traz consigo um apelo pelo desenvolvimento e articulação de métodos e políticas que diminuam esses impactos ambientais. Deste modo, o presente estudo tem como objetivo elaborar um compêndio através de pesquisas e referências bibliográficas, para explorar, divulgar e dar mais visibilidade ao que pode ser um problema grave na esfera ambiental e sustentável nas décadas futuras. Para alcançar tal objetivo, foi realizada uma pesquisa qualitativa, de caráter descritivo e exploratório a partir de técnicas de coleta documental, análise de conteúdo bibliográfica e documental. Foram realizadas análises acerca do potencial impactante desta tecnologia, utilizando do método de Avaliação do Ciclo de Vida, analisando com isso os impactos dos painéis fotovoltaicos desde a extração da matéria prima e a manufatura até a gestão residual ao final de sua vida útil. O estudo traz ainda uma análise sobre os processos e as tecnologias envolvidas na gestão residual dos painéis fotovoltaicos utilizados ao redor do mundo através da prática da reciclagem, a possibilidade de aplicação de filosofias como a Low Tech na fabricação de novos materiais, e os possíveis resultados que uma gestão residual correta pode ter na diminuição de impactos ambientais pelo mercado fotovoltaico. Os resultados obtidos através da discussão elaborada demonstram que apesar do processo de manufatura ser o que mais causa impacto no ciclo de vida de um módulo fotovoltaico, o processo de gestão possui uma parcela considerável de responsabilidade, como a segunda etapa mais impactante. Além disso, enquanto uma mudança no método de manufatura seria mais eficiente para reduzir os riscos ambientais, ele não se aplicaria aos sistemas já instalados e presentes no mercado, enquanto uma gestão adequada abarcaria toda a tecnologia já fabricada e os produtos ainda por vir. Segundo os estudos analisados, a reciclagem apresenta resultados que indicam um caminho eficiente para a gestão de resíduos. Uma análise quantitativa dos resíduos gerados demonstra que um processo bem empregado de reciclagem dos módulos tem o potencial de reduzir em até 95,4% das emissões de CO₂, 89,75% de emissões de SO₂ e 328.950 toneladas de resíduos sólidos.

Palavras – chave: Fotovoltaica; Impacto; Módulo; Reciclagem; Resíduos.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil
- Figura 2:** Componentes de um módulo fotovoltaico
- Figura 3:** Composição de módulos fotovoltaicos
- Figura 4:** Fases da Avaliação do Ciclo de Vida
- Figura 5:** O ciclo de vida de um painel fotovoltaico
- Figura 6:** Impactos ambientais de um sistema com 1 kWp de potência em diferentes estágios
- Figura 7:** Abordagem para qualificar resíduos de painéis fotovoltaicos
- Figura 8:** Diagrama de fluxo do processo do círculo da vida para painéis fotovoltaicos e oportunidades resultantes para redução, reutilização ou reciclagem
- Figura 9:** Esquema do processo para reciclagem dos módulos fotovoltaicos c-Si
- Figura 10:** Esquema do processo para reciclagem dos módulos fotovoltaicos CdTe
- Figura 11:** Projeção da expansão em capacidade e em energia da Geração Distribuída
- Figura 12:** Projeção de impactos ambientais para cenários da GD em 2030 com e sem reciclagem de resíduos

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AGCM	Agência Italiana de Defesa dos Consumidores
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BNL	Laboratório Nacional de Brookhaven
CdTe	Telureto de Cádmio
CO_2	Dióxido de carbono
cSi	Silício Cristalino
EVA	Acetato-vinilo de etileno (termo em inglês <i>Ethylene Vinyl Acetate</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (<i>Electric Power Research Institute</i>)
FRELP	Full Recovery End-of-Life Photovoltaic
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída ou Descentralizada
GW	Gigawatts
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável (<i>International Renewable Energy Agency</i>)
ISO	International Organization for Standardization
kWp	Quilowatt-pico
MW	Megawatts
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
REPA	Resource Environmental Profile Analysis
Sisnama	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SO_2	Dióxido de enxofre
SoG-Si	Silício de Grau Solar
W	Watts

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	CONCEITOS PRELIMINARES	15
2.1	Geração Fotovoltaica no Brasil.....	15
2.2	Geração Distribuída x Geração Centralizada.....	17
2.3	O Módulo Fotovoltaico	18
3.	METODOLOGIA.....	21
4.	IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	22
4.1	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	23
4.2	ACV de um Painel Fotovoltaico	25
4.3	Conclusões da Análise ACV	27
5.	DESAFIOS DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	29
5.1	Gestão de Resíduos Fotovoltaicos no Brasil Atual	29
5.2	Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos.....	30
5.2.1	Legislação	31
5.2.2	Tecnologia	32
5.2.3	Financeiro.....	35
5.3	Estimativa da produção de resíduos sólidos no Brasil	36
5.4	Filosofia Low Tech Aplicada ao Mercado Fotovoltaico	37
6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	41
	REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais impactada pelo crescimento populacional e de consumo, e indispensável para a evolução social, econômica e tecnológica da humanidade, a produção de energia elétrica está sempre em constante crescimento. Sendo a sustentabilidade um dos temas mais debatidos na atualidade, com fóruns mundiais debatendo regulamente sobre medidas de preservação do meio ambiente, é natural que no campo da produção de energia os olhos se voltem para a utilização de fontes renováveis.

Neste cenário, pode-se notar o crescimento exponencial da energia solar no mercado, com um número cada vez maior de painéis fotovoltaicos em residências e uma participação crescente da geração de solar na matriz elétrica brasileira. A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotovoltaico (IMHOFF, 2007), essa fonte é dita como renovável sendo alimentada por recursos naturais abundantes e de fácil acesso.

No Brasil, a geração de energia solar fotovoltaica é atualmente a segunda principal fonte do país, juntamente com a produção de energia eólica (mesmo valor percentual de participação na matriz elétrica), com um equivalente de 27,84 GW de capacidade instalada e correspondendo a 12,6% da matriz elétrica brasileira segundo dados disponibilizados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023). Existem dois mercados de geração fotovoltaica no Brasil: o de geração centralizada, que é o segmento de usinas de grande porte, e equivale a 8,367 GW da energia elétrica proveniente de fontes fotovoltaicas, e a geração distribuída, que trata de sistemas residenciais e comerciais de pequeno porte, sendo responsável por gerar cerca de 19,47 GW. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), no ano de 2022, o Brasil adicionou cerca de 9,3 GW de energia solar fotovoltaica, registrando um avanço de 66% (ANEEL, 2023).

Segundo a ABSOLAR (2023), a previsão para o ano de 2023, para a geração solar fotovoltaica no Brasil é de acrescentar cerca de 10 GW alcançando assim a capacidade instalada acumulada de 34 GW na fonte, o que corresponde a um crescimento de 52% em relação a potência atual. Ainda conforme a entidade, desse total, estima-se que 21,6 GW serão provenientes do mercado de geração distribuída, com participação dos sistemas de pequenos e médios porte de geração própria, enquanto os demais 12,4 GW serão de geração centralizada, proveniente de grandes usinas solares (ABSOLAR, 2023).

No entanto, ainda que do ponto de vista de sustentabilidade, o crescimento de uma fonte de energia renovável seja algo a se comemorar, não chega a ser algo perfeito. Apesar de ser uma fonte renovável de geração de energia, deve-se ter em mente que não existe uma fonte de energia perfeita, e o sistema de geração solar fotovoltaico apesar de não produzir poluentes no processo de produção de energia, ainda pode agredir o ecossistema do planeta. Na fabricação dos painéis solares, a matéria-prima da tecnologia fotovoltaica é o silício, que precisa ainda ser purificado para produzir o *wafers* e os demais processos até se chegar no módulo fotovoltaico. Portanto, a produção dos módulos pode gerar

impactos ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2017), que podem estar relacionados ao uso recursos, a danos à saúde humana e a consequências ecológicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). Dessa forma, é necessário atentar não apenas ao setor de geração de energia, como também à manufatura e ao descarte dos painéis solares, onde o material em questão, após o seu tempo de vida útil, é, até então dificilmente reutilizado ou reciclado.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em 2016, estimava-se que cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis solares seriam descartados no mundo até o ano de 2050, com o crescimento do mercado de geração solar, e o aumento considerável de produção, este número tende a ser ainda maior (IRENA, 2016). Os painéis de energia solar fotovoltaica descartados são classificados na mesma categoria que o lixo eletrônico, e no ano de 2016 o IRENA (2016) indicou que apesar de possuir materiais de valor em seus resíduos, o aspecto econômico associado para a reciclagem dos painéis ainda não compensava, sendo inclusive indicado pelo Electric Power Research Institute (EPRI) que estes painéis velhos fossem armazenados com segurança e aguardassem o avanço da tecnologia para otimizar seu processo de reciclagem (EPRI, 2016). Nos anos atuais, já houve um desenvolvimento o avanço das tecnologias e operações utilizadas no processo de reciclagem em alguns países pioneiros desse mercado, como a Alemanha, onde se obtiveram bons resultados, entretanto, no Brasil, a reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda é recente (PRADO, 2018).

O presente estudo tem como objetivo explorar e descrever a problemática associada ao descarte de painéis fotovoltaicos, utilizando de óticas como a reciclagem de materiais eletrônicos, as novas tecnologias do mercado fotovoltaico, a abordagem da filosofia como a Low Tech, que se refere defende o uso de tecnologias que permitam uma maior autonomia e resiliência local, além de um menor impacto ambiental e social quando comparadas às tecnologias de alta complexidade que precisam ser constantemente repostas (BIHOUIX, 2014), e demais abordagens, elaborando assim um compêndio sobre a temática e visando dar visibilidade a um tema de grande importância no âmbito da sustentabilidade, ecologia e geração de energia. Com a finalidade de alcançar este objetivo final, foi inicialmente analisado o panorama do mercado de geração fotovoltaica nos últimos anos, até a atualidade e uma previsão do crescimento futuro, para contextualizar o cenário de estudo, seguindo por uma busca por soluções tomadas atualmente no descarte de painéis solares, e soluções propostas tanto para o cenário de geração solar, como os movimentos de mercado atual para áreas similares, como o descarte de equipamentos eletrônicos e o movimento Low Tech, na mesma área, que busca o investimento por tecnologias mais duráveis, ou de fácil manutenção, para diminuir o descarte e desuso de mercadorias.

2. CONCEITOS PRELIMINARES

O presente capítulo apresenta uma abordagem sobre os temas de interesse envolvidos no estudo, tais como o panorama da geração solar fotovoltaica no Brasil, a composição de uma placa fotovoltaica e a avaliação de seu ciclo de vida, entre outros tópicos, a fim de possibilitar a interpretação do assunto sobre os temas abordados neste trabalho, nos capítulos subsequentes.

2.1 Geração Fotovoltaica no Brasil

Nos últimos anos a presença de placas fotovoltaicas como parte da arquitetura urbana e em grandes terrenos no interior, tem ganhado cada vez mais visibilidade na paisagem, discussões sobre a implementação de painéis solares se tornam cada vez mais frequente, e a popularização do mercado de energia solar só aumenta. Entretanto, apesar da importância da geração solar na matriz elétrica brasileira, e o número de consumidores e empresários em busca da fonte, a energia solar é uma área considerada nova no mercado de energia. Com surgimento recente no cenário do país, quando comparado com a presença de outras fontes como combustíveis fósseis, hidroelétricas ou termoeletricas, o mercado de energia solar ainda conta com uma boa margem para amadurecimento. Enquanto a primeira hidroelétrica e a primeira termoeletrica brasileiras foram criadas no final do século XIX, a primeira usina fotovoltaica no Brasil surgiu apenas no ano de 2011, instalada no município de Tauá, no sertão do Ceará, a 360 km da capital Fortaleza, contando com 4.680 painéis fotovoltaicos, e capacidade inicial de geração de 1 megawatt (BEIGELMAN, 2013).

Apesar do início tardio, a geração solar cresceu rapidamente no mercado. Em 2012, um ano após a criação da primeira usina, ocorreu o primeiro marco regulatório da produção de energias alternativas, o que representou uma grande mudança no setor de energia solar, marcado pela publicação da Resolução Normativa nº 482, ou RN/482, instituída pela ANEEL. A norma permitiu que o consumidor fosse capaz de gerar sua própria energia, conectada à rede de distribuição, e desta forma, viabilizou tanto a produção por microgeradores, como painéis solares no telhado de residências, quanto por minigeração, em Fazendas Solares. A norma também possibilitou a criação de sistemas de créditos energéticos e estabeleceu os critérios necessários para a conexão de sistemas à rede. Além da RN/482, em vigência até os dias atuais, o governo também instituiu outras medidas para incentivar o uso de energias renováveis, como a isenção de IPI ou ICMS, apoio do BNDES, redução do Imposto de Importação, e na implementação do marco legal da energia solar, que se tratou de uma série de regulamentações, leis e normas técnicas criadas com o objetivo de fomentar o mercado de geração distribuída de energia solar no Brasil. Entre as principais medidas estão a Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL, que estabeleceu as regras para a micro e minigeração distribuída, a Lei 13.169/2015, que instituiu o programa de incentivo à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, e a Resolução Normativa 819/2018, que estabeleceu regras para a geração compartilhada de energia solar. Essas medidas foram instituídas com a intenção de

auxiliar no crescimento da fonte em desenvolvimento, devido a sustentabilidade que envolve essa fonte renovável de geração, e ao potencial para geração fotovoltaica de energia elétrica no Brasil, onde mesmo no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

A partir dos incentivos fiscais durante os anos seguintes, o mercado de energia solar cresceu de forma exponencial. Enquanto no ano de 2012 produzia cerca de 7 MW de energia por ano, em 2020, o Brasil teve a capacidade de gerar cerca de 6.000 MW, ou 6 GW. Ainda nesse mesmo período, foi responsável por trazer mais de 31 bilhões de reais em novos investimentos e gerou mais de 180 milhões de empregos (ABSOLAR, 2023). A produção e o crescimento do mercado foram tão expressivos que em 2015, percebeu-se a necessidade de criar critérios e parâmetros novos, juntamente a uma nova regulamentação, a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, atualizada pela Resolução Normativa nº 687/2015, que estabelecesse diferenças entre: microgeração de energia (caracterizada pela instalação de sistemas de geração de até 75 kW em residências e pequenos comércios), minigeração de energia (instalação de sistemas de geração de energia elétrica de 75 kW até 5 MW), autoconsumo remoto (onde a energia gerada por um sistema fotovoltaico é utilizada em outro local diferente daquele onde está instalado o sistema), e geração compartilhada (é a possibilidade de vários consumidores se unirem em um consórcio ou cooperativa para instalar um sistema de geração distribuída em um local próximo à rede elétrica, de forma a compartilhar os custos e benefícios da geração) (ANEEL, 2015).

Mais recentemente, em abril de 2021, a ANEEL estabeleceu novas regras para a geração de energia solar no Brasil, através da Resolução Normativa nº 687/2015, que substituiu a RNº 482/2015. Com a nova resolução, ficou estabelecido que a partir de 2023, o valor pago pelos créditos de energia elétrica será reduzido gradualmente, até que em 2030, o subsídio seja totalmente eliminado, significando que os consumidores geradores de energia solar em suas casas ou empresas passarão a pagar mais pela energia que consomem da rede elétrica, diminuindo assim a atratividade financeira dos sistemas de geração distribuída. Além disso, a nova resolução estabeleceu novas regras para o acesso de novos consumidores à geração distribuída, incluindo o estabelecimento de limites de capacidade de geração para cada consumidor e a criação de um sistema de cobrança de tarifas de uso da rede elétrica para os consumidores que geram energia solar. Essas mudanças ficaram conhecidas como o novo marco legal da energia solar.

Apesar da diminuição de incentivos fiscais e governamentais para implementação e desenvolvimento da energia solar, o mercado segue em constante crescimento e a tendência é crescer ainda mais nos próximos anos. Ainda existem incentivos notáveis que garantem essa premissa, como linhas de financiamento de energia solar com prazos de pagamento prolongados e juros mais baixos, além da diminuição do custo para aquisição de painéis solares, o que deixa o mercado atrativo. A partir desse ponto, estima-se que em 2023, a geração solar fotovoltaica no Brasil acrescente ainda 10 GW de geração, alcançando assim uma nova marca para capacidade instalada acumulada de 34 GW na fonte. Desta forma, como mencionado anteriormente, tal pressuposto pode corresponder a um crescimento de 52% em relação a potência atual, o qual se estima que 21,6 GW serão provenientes do mercado de geração distribuída, e os demais 12,4 GW

correspondam ao sistema de geração centralizada (ABSOLAR, 2023). Por se tratar de uma fonte relativamente nova de energia, as tecnologias envolvidas nos sistemas de geração fotovoltaica estão em constante desenvolvimento. Isso faz com que tenham módulos mais eficientes a cada ano, mão de obra mais especializada e abundante, uma potência maior por metro quadrado de instalação, e um número maior de indústrias que manufaturem os equipamentos. Todos esses fatores fazem com que a energia solar se torne uma fonte mais eficiente, com tecnologias sempre atuais, e mais acessíveis financeiramente.

2.2 Geração Distribuída x Geração Centralizada

O mercado de energia solar brasileiro é dividido quanto ao tipo de geração, sendo categorizado entre Geração Distribuída ou Descentralizada (GD) e Geração Centralizada (GC).

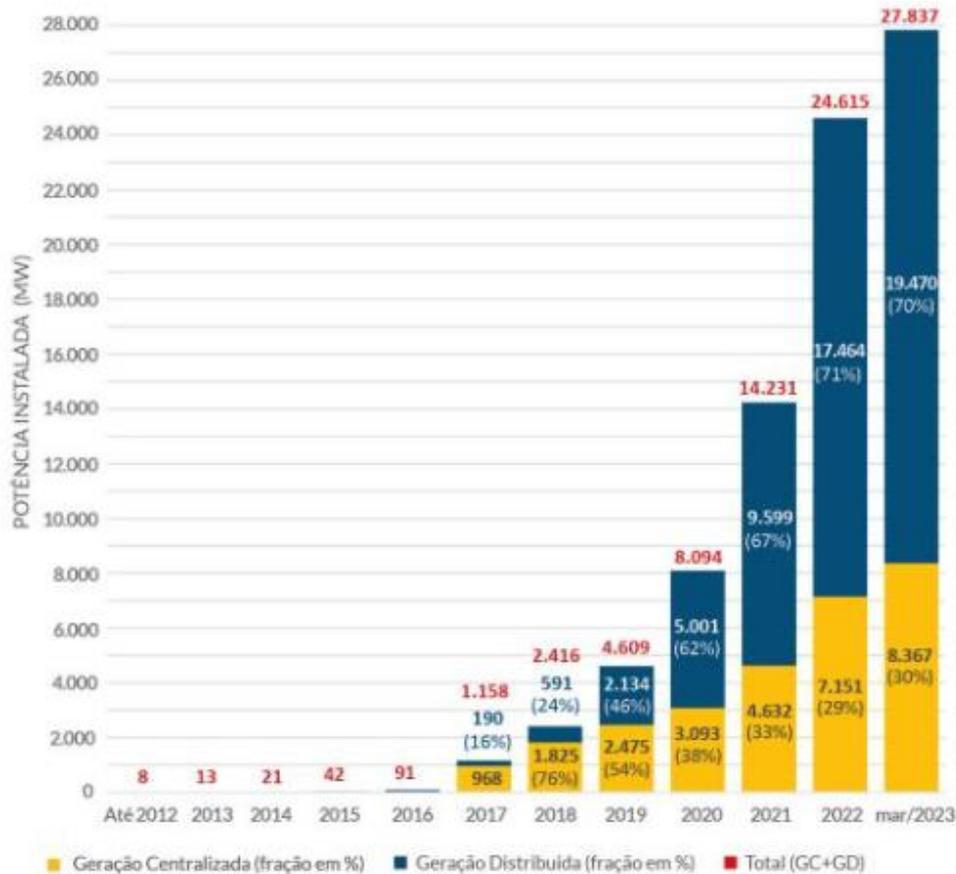
A geração centralizada é uma das formas mais tradicionais de geração de energia, caracterizada por uma geração elevada, com usinas de alta capacidade de geração instalada, numa mesma área, onde utiliza-se de poucas unidades geradoras, com uma maior capacidade de geração na produção de eletricidade para muitas pessoas. Sendo geralmente construídas em terrenos afastados de grandes cidades, essas usinas resultam na necessidade de linhas extensas de transmissão. Por isso, antes da construção de um projeto de energia centralizada, são feitos vários estudos sociais, locais e, especialmente, ambientais, para garantir que a construção e a operação das usinas estejam de acordo com as leis e normas de segurança. Esse tipo de geração provém dos investimentos de grandes empresas, que produzem a energia a fim de lucrar com sua comercialização para a população em geral, sendo principalmente direcionado para o mercado cativo por meio de leilões de energia e do Mercado Livre de Energia.

A geração descentralizada por sua vez é o modelo de geração caracterizado por existirem várias unidades geradoras de menor porte abastecendo clientes locais na rede, minimizando os custos com a transmissão de energia e evitando perdas energéticas relacionadas ao cabeamento e transmissão da energia gerada em usinas de geração centralizadas, garantindo maior estabilidade e confiabilidade do sistema. Essa modalidade passou a valer em 2012, com a Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL, a qual é, geralmente, o tipo de projeto optado por pessoas físicas que querem diminuir os gastos de eletricidade na sua residência familiar, ou de pequenas empresas, com o mesmo objetivo. Desta forma, esse modelo vem sendo comumente implementado nos estabelecimentos em questão, seja casa ou empresa, ou em terrenos arrendados em cidades do interior dos estados, sendo, portanto, responsáveis pela quantidade de painéis visíveis no cenário urbano.

Com respeito aos aspectos representativos, a geração centralizada corresponde a cerca de apenas 30% da geração fotovoltaica de energia elétrica no Brasil, frente aos 70% da geração proveniente da modalidade descentralizada (Figura 1), segundo os últimos dados apontados pela ABSOLAR (2023). Para além da capacidade instalada, os dados sobre a evolução do mercado fotovoltaico no país apontam que no ano de 2021, a geração distribuída representava 67% da geração de energia fotovoltaica, e a geração centralizada

era responsável por 33%. Esses percentuais demonstram um crescimento do setor distribuído no mercado frente ao setor de geração centralizada. À vista disso, é possível compreender que o setor de geração distribuída é mais representativo no mercado de energia brasileiro (ABSOLAR, 2023).

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil

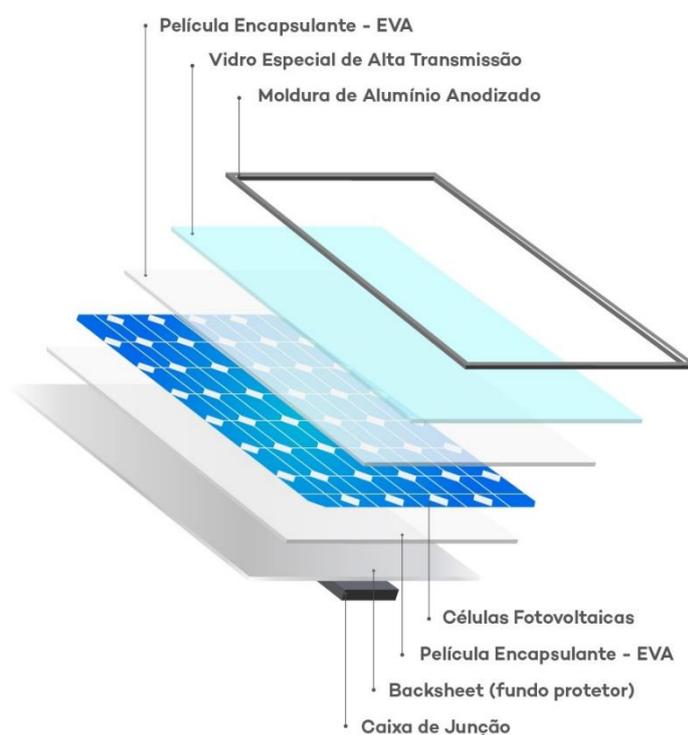


Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.

2.3 O Módulo Fotovoltaico

Principal componente de qualquer sistema de geração fotovoltaico, as placas solares possuem diferentes materiais em sua composição, e passam por diversos processos individuais interligados, para anexar as células fotovoltaicas, no painel solar. Dentre os materiais, estão: as células fotovoltaicas; o vidro fotovoltaico (especial para a fabricação do painel solar); o filme encapsulante – EVA; o *backsheet* (Material plástico branco que vai na parte de trás do painel solar); a caixa de junção; e a moldura do painel solar de alumínio anodizado (Frame do Painel Solar) conforme visto na Figura 2.

Figura 2 - Componentes de um módulo fotovoltaico



Fonte: NeoSolar, 2023.

O vidro utilizado na fabricação de um painel solar é um vidro especial, com baixo teor de ferro, desenvolvido especialmente para refletir o mínimo possível da luz e deixar radiação solar passar através dele. Trata-se de um vidro temperado revestido com uma substância antirreflexiva que representa aproximadamente 10% do custo de fabricação do painel solar (PORTAL SOLAR, 2023).

O filme encapsulante para o painel solar, tradicionalmente conhecido como EVA, acetato-vinilo de etileno, é um material projetado especificamente para painéis fotovoltaicos, e se trata de um material selante de cura rápida cuja função é proteger as células fotovoltaicas contra o desgaste causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade, que podem danificar, ou diminuir a eficiência de produção do módulo, e assegurando que uma maior quantidade de luz atinja as células solares (PORTAL SOLAR, 2023). Apesar de não ser o único tipo de encapsulante, o EVA é o mais utilizado, e representa aproximadamente 8% do custo de fabricação do painel solar.

O *Backsheet* é uma espécie de filme branco encontrado na parte de trás do painel solar, e sua função principal é de proteger os componentes internos do painel, especificamente as células fotovoltaicas bem como agir como um isolante elétrico. Esse material é robusto, e representa aproximadamente 8% do custo de fabricação do painel solar (PORTAL SOLAR, 2023).

A caixa de junção é um equipamento que fica na parte de trás do painel solar onde as células fotovoltaicas estão interconectadas eletricamente. A caixa é fixada na parte de trás do painel solar e possui em seu interior diodos de *by-pass* que vão garantir a

segurança e o bom funcionamento do painel solar. Esse material é o responsável pela conexão dos painéis solares com os demais componentes elétricos utilizados nos sistemas de geração fotovoltaica, utilizando de cabos e conectores especiais (tradicionalmente se utiliza os conectores MC4 ou MC3) e representa aproximadamente 6% do custo de fabricação do painel solar (PORTAL SOLAR, 2023).

Ao redor de um painel é adicionada ainda uma moldura de alumínio anodizado especialmente desenvolvida para adicionar robustez ao painel solar e garantir a sua integridade nas mais adversas situações. Ela serve para proteger o painel na hora da instalação, e também de movimentos laterais que possam vir a "torcer" o material, causando trinca nas células. O frame do painel solar representa aproximadamente 8% do custo dele (PORTAL SOLAR, 2023).

Para completar, tem-se as células fotovoltaicas, principais responsáveis pelo custo do equipamento (cerca de 60%), cuja função é desempenhar a captação e conversão da luz solar em energia elétrica. De acordo com Villalva (2015), os módulos podem ser compostos por diferentes tipos de materiais, porém, destaca-se que o silício faz parte de 95% dos módulos produzidos mundialmente. O desenvolvimento dos módulos fotovoltaicos é constituído a partir da ideia de produzir uma energia limpa. Os componentes pertencentes às placas podem variar, enquanto, alguns são mais eficientes e outros economicamente viáveis ao público, em parte tudo varia conforme o projeto é destinado no qual elas sejam aplicadas. Em sua maioria, os materiais de conversão fotovoltaica dos módulos são provenientes de materiais semicondutores (Figura 3) como o Silício, podendo ser na forma de monocristalino, policristalino, ou filmes finos (STEINER, 2020).

Figura 3 - Composição de módulos fotovoltaicos

Materiais	Silício Monicristalino / Policristalino	Filme Fino de Telureto de Cádmio
Vidro	74,16%	95,00%
Polímero	11,31%	3,50%
Alumínio	10,30%	0,35%
Silício	3,35%	-
Cobre	0,57%	1,00%
Prata	0,01%	-
Estanho	0,12%	-
Zinco	0,12%	0,01%
Chumbo	0,06%	-
Telúrio	-	0,07%
Cádmio	-	0,07%

Fonte: Adaptado de IRENA, 2016.

3. METODOLOGIA

Os aspectos metodológicos dessa pesquisa desenvolvem-se baseados na abordagem do método materialista dialético, “que penetra o mundo dos fenômenos através de sua ação recíproca, da contradição inerente ao fenômeno e da mudança dialética que ocorre na natureza e na sociedade” (MALCONI e LAKATOS, 2003, p. 106). A pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, uma vez que visa entender, descrever e explicar os fenômenos sociais complexos de modos diferentes, através da análise de múltiplas relações e experiências, assim como da investigação de documentos escritos ou traços semelhantes de experiências e integrações (FLICK, 2009; RICHARDSON, 1999). De caráter descritiva e exploratória, a pesquisa combina a pretensão de descrever os fatos e fenômenos de determinada realidade (TRIVIÑOS, 1987) com o objetivo de “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses”, como afirma Gil (2002, p.41). No que tange aos procedimentos de pesquisa, está delineada pela pesquisa bibliográfica e documental, utilizando-se de documentos científicos e relatórios, e para realizar tais procedimentos foram aplicadas as técnicas de coleta documental, análise de conteúdo e pesquisa semiestruturada (MARCONI e LAKATOS, 2003; GIL, 1999, 2002).

De forma prática foi realizada uma pesquisa e análise de uma vasta gama de referências sobre os temas relacionados ao mercado de módulos fotovoltaicos, materiais utilizados e às práticas e normas associadas ao descarte dos resíduos fotovoltaicos. Ainda, foram realizados contatos com empresas do mercado de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Mais especificamente, a metodologia utilizada consistiu em obter primeiramente uma contextualização sobre o mercado a que se aplica a tecnologia fotovoltaica, seguido por análises realizadas acerca do potencial impactante dos painéis solares durante sua vida útil, utilizando do método de Avaliação do Ciclo de Vida, e então, a partir dos resultados concluídos nessa etapa, partiu-se para o estudo e análise dos mecanismos, tecnologias e processos mais utilizados na gestão de resíduos atualmente.

Além do trabalho qualitativo, foi realizada uma estimativa dos resíduos de módulos fotovoltaicos resultantes do vasto e crescente mercado fotovoltaico no Brasil. Essa estimativa foi realizada com base na literatura e nos dados sobre o mercado fotovoltaico e permite vislumbrar a problemática dos resíduos que será enfrentada em um futuro próximo no Brasil.

4. IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia solar é reconhecidamente uma fonte renovável, com capacidade de se regenerar naturalmente ou através de processos humanos em uma escala de tempo razoável, não se esgotando com o uso e podendo ser utilizada de forma contínua sem causar danos irreversíveis ao meio ambiente. É, portanto, um tipo de fonte reabastecida por processos naturais a um ritmo igual ou superior à sua utilização (TESKE; LINS; MUTH, 2013). Entretanto, apesar de ser uma forma de geração de baixo impacto ambiental, deve-se ter consciência que todos os processos humanos de geração de energia, possuem algum impacto ao meio ambiente, e a geração fotovoltaica não é diferente.

Dentre os potenciais impactos causados, tem-se que a grande maioria acontece no processo de manufatura, e na gestão de resíduo após a vida útil (FTHENAKIS; KIM, 2011). Durante a produção, a fabricação de painéis solares envolve o uso intensivo de energia e matérias-primas, incluindo a extração de minerais e metais como silício, alumínio, cobre e prata. O processo de extração e produção desses materiais pode gerar emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar, do solo e da água (FTHENAKIS; KIM, 2011). Os impactos gerados na gestão de resíduos são significativamente menores que os impactos gerados na manufatura, e dependem do tipo de processo utilizado sendo a reciclagem, o processo menos nocivo, mas que ainda pode gerar resíduos ao final do processo, e emissões de gases durante as etapas da reciclagem (KOZEN, 2020). A depender do processo utilizado, o período de pós vida do painel pode também gerar emissões de gases, resíduos e até mesmo à contaminação do solo e da água, caso haja um descarte inadequado (FTHENAKIS; KIM, 2011).

Os impactos ambientais do sistema de geração fotovoltaica, entretanto, acontecem durante todas as etapas desde a manufatura, transporte, instalação e operação até o descomissionamento ou reciclagem dos equipamentos (TAWALBEH *et al.*, 2021). Estudos identificaram cerca de 32 formas diferentes de impactos ambientais, sejam classificados como impactos a saúde humana, clima, vida nativa, utilização do terreno, água ou solo, porém, 22 desses impactos são classificados como de baixo nível e 4 como médio impacto, enquanto ainda se faz necessário mais estudos para reconhecer o efeito real dos 6 impactos restantes (TAWALBEH *et al.*, 2021). A pegada de carbono derivada da tecnologia dos sistemas de geração fotovoltaica está entre 14g e 17g de CO_2eq/kWh , depender de uma série de fatores como o tipo de tecnologia aplicada aos módulos e dos processos utilizados em sua fabricação (TAWALBEH *et al.*, 2021).

Dessa forma, levando em consideração o atual panorama nacional e o crescimento esperado da geração fotovoltaica no Brasil, faz-se necessário realizar uma avaliação mais profunda dos impactos envolvidos nessa forma de geração. Um método bastante estabelecido na área de pesquisa para avaliar os impactos que um processo produtivo possa ter é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de determinado produto ou processo. A ACV é um método bastante utilizado para quantificar impactos ambientais por ser uma ferramenta consolidada e robusta. Além de avaliar os impactos ambientais, a ACV é importante para o aprimoramento de um processo produtivo, para tomada de decisões, definições de prioridades, entre outros (OLIVEIRA, 2017).

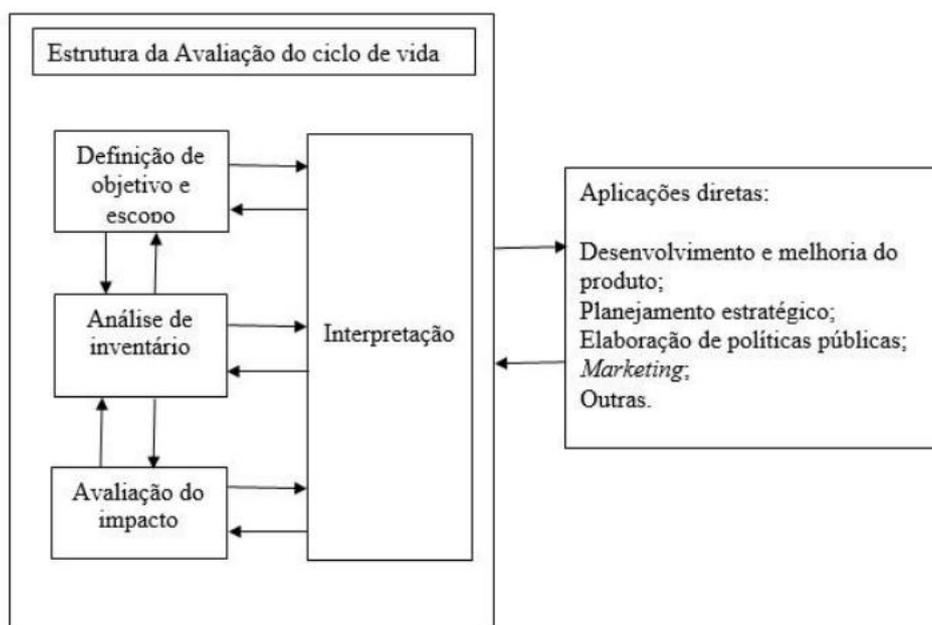
4.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Os estudos sobre ACV tiveram início durante a primeira crise do petróleo em meados da década de 60. A partir desse período, o mundo despertou para a necessidade de utilizar melhor e de maneira mais sustentável os recursos naturais. Iniciaram-se então, estudos para avaliar os processos produtivos com o intuito de otimizar o consumo energético. Esses estudos ficaram conhecidos como *Resource Environmental Profile Analysis* – REPA (JUNIOR *et al.*, 2007). Com o aumento da preocupação com a degradação ambiental causada pelas atividades humanas e o surgimento de estudos sobre o impacto ambiental de produtos e serviços, a ACV foi gradativamente sendo desenvolvida por vários pesquisadores em diferentes países ao longo do tempo. Assim, a metodologia da ACV evoluiu, com a finalidade de avaliar esses impactos de forma sistemática e abrangente, com toda uma comunidade científica internacional que contribuiu para o desenvolvimento e aprimoramento da metodologia.

Utilizada para avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço em todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até seu descarte ou reciclagem, a ACV é uma metodologia que considera o uso de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, geração de resíduos e outros impactos ambientais relacionados a cada etapa do ciclo de vida do produto ou serviço avaliado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). A ACV é uma ferramenta importante para identificar oportunidades de melhoria ambiental em produtos e serviços, bem como para orientar decisões de negócios, governamentais e políticas públicas que visam a redução do impacto ambiental e a promoção do desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA, 2017). Consequentemente, com base nos resultados da ACV, é possível desenvolver estratégias para a melhoria do desempenho ambiental dos produtos e serviços, desde o seu projeto até o final do ciclo de vida.

O ciclo de vida é um conjunto de etapas dentro de uma cadeia produtiva, sendo levado em conta, na maioria dos estudos, os impactos ambientais contabilizados durante a análise. Dessa forma a Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta frequentemente utilizada para auxiliar em tomadas de decisões, baseada nos resultados levantados por essa avaliação (BLUMENSCHHEIN; MILLER, 2016). As fases da ACV (Figura 4), de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), se dividem em quatro: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e a interpretação dos resultados. Todas essas fases são normatizadas pela ISO 14040 Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

Figura 4 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001.

As quatro etapas são caracterizadas e definidas pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001) como:

- **Definição do objetivo e escopo:** Nesta etapa, é definido o objetivo da ACV e o escopo do estudo. O objetivo deve ser claro e específico, indicando o que se espera alcançar com a avaliação. O escopo define o sistema que será avaliado, incluindo os limites do sistema, as unidades funcionais, os processos e as entradas e saídas do sistema.
- **Análise do inventário:** Nesta segunda etapa, é feita a coleta de dados sobre as entradas e saídas do sistema avaliado, o que inclui a extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e disposição final do produto ou serviço. O objetivo é identificar e quantificar as entradas e saídas de energia, materiais e emissões de gases de efeito estufa em cada fase do ciclo de vida do produto ou serviço.
- **Avaliação do impacto:** Aqui, os dados coletados na etapa anterior são analisados para avaliar o impacto ambiental do produto ou serviço em estudo. Os impactos ambientais avaliados podem abranger mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, uso da água, entre outros.
- **Interpretação dos resultados:** Na última etapa, os resultados da ACV são interpretados com o objetivo de identificar os principais impactos ambientais e oportunidades de melhoria no ciclo de vida do produto ou serviço avaliado. Os resultados também podem ser comparados com outras alternativas para

orientar decisões de negócios, políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável.

Vale destacar que não existe produto ou sistema que não gere impacto: tudo causa impacto ambiental de alguma maneira. A ACV de determinado produto, também envolve examinar a produção dos elementos mais específicos. Toda manufatura utiliza ou produz energia, o que significa que todo material industrializado ou produto incorpora energia. Portanto, para balancear essa energia, emissões e fluxos de água, faz-se necessária a análise de recursos, materiais, produtos e sistemas, incluindo seu tempo de vida útil, para um projeto mais sustentável e integrado (KEELER; BURKE, 2010).

Para compreender e analisar os resultados da Avaliação de Ciclo de Vida, este estudo apresenta algumas percepções e descobertas de pesquisadores de diferentes lugares no globo que buscaram explicar e entender a ferramenta, de forma que suas análises e resultados viessem a contribuir para possíveis soluções e novos aspectos a serem considerados e discutidos.

4.2 ACV de um Painel Fotovoltaico

Para compreender e analisar os resultados da Avaliação de Ciclo de Vida, este estudo apresenta algumas percepções e descobertas de pesquisadores de diferentes países e cenários que buscaram explicar e entender a ferramenta aplicada à geração fotovoltaica, de forma que suas análises e resultados viessem a contribuir para possíveis soluções e novos aspectos a serem considerados e discutidos.

Com base em diversos estudos, Xu Liang *et al.* (2018) realizaram a análise do ciclo de vida de um painel solar desde a extração do silício até a utilização e reciclagem do material, como ilustrado na Figura 5. O sistema fotovoltaico utilizado consistiu-se em um sistema em território chinês, com 1 kWp de potência, e cinco módulos de 200 W com células de silício policristalino com 16% de eficiência.

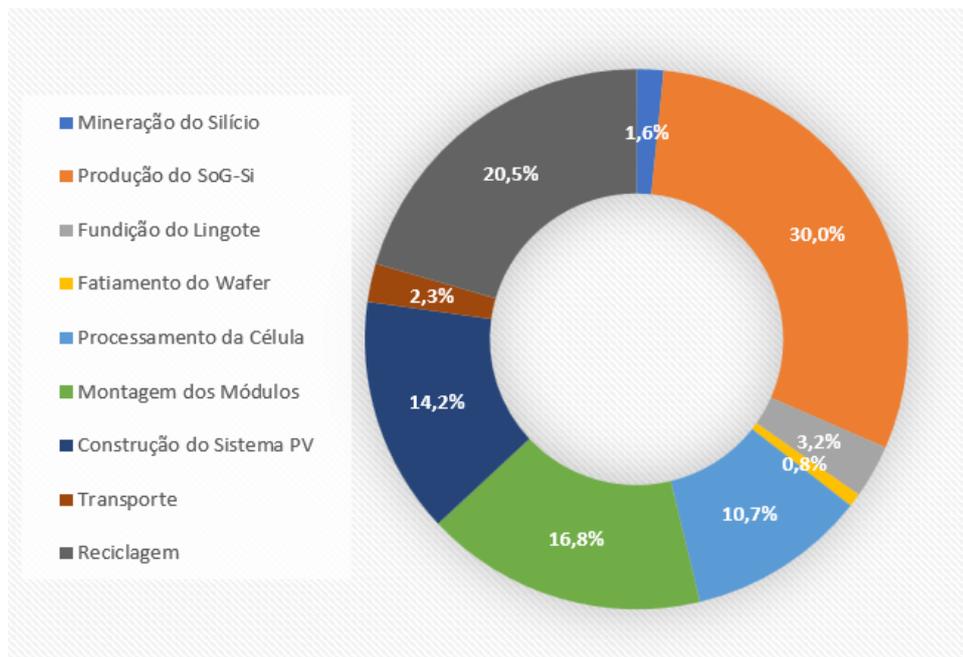
Figura 5 - O ciclo de vida de um painel fotovoltaico



Fonte: Adaptação compilada de Xu Liang *et al.* (2018) com base em Fu *et al.* (2015)

O resultado da análise de ciclo de vida realizado pelos autores (Figura 6) indica que, no aspecto ambiental, os impactos nos processos de mineração, de produção do lingote de silício, e de transporte são relativamente baixos. Sendo os estágios de maior impacto ao meio ambiente a etapa de produção do SoG-Si (Silício de Grau Solar com 99.9999 % de pureza), a qual é equivalente a 30,0% do impacto total do ciclo, e a etapa de reciclagem, equivalendo a 20,5% do impacto total, como podemos observar na Figura 6. Outros setores que se destacam negativamente na análise são os de montagem dos módulos e construção do sistema fotovoltaico.

Figura 6 - Impactos ambientais de um sistema com 1 kWp de potência em diferentes estágios



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Xu Liang *et al.*, 2018.

No estudo de Eskew *et al.* (2018), a ACV de um sistema fotovoltaico de telhado, com 52,7 kWp de potência, a ser instalado no campus da Universidade de Bangkok, teve por objetivo atestar como a geração distribuída em coberturas residenciais pode compensar os encargos ambientais da geração de eletricidade convencional, ao mesmo tempo em que atinge os objetivos nacionais para energias renováveis. A análise foi realizada para dois diferentes cenários de final de ciclo, sendo eles o de reciclagem dos materiais recicláveis e o simples tratamento de resíduos de todos os componentes incluídos no sistema.

Eskew *et al.* (2018) realizaram o estudo de ACV de um sistema contendo 170 módulos policristalinos, 6 inversores com 30 kW de potência, oito interruptores de circuito, além da estrutura de montagem, cabos condutores, e de corrente direta, e 39 fusíveis. Diferentemente dos resultados obtidos por Xu, Liang *et al.* (2018), os resultados encontrados ao final da ACV realizada por Eskew *et al.* (2018) indica que as etapas de fabricação geram a maioria dos impactos na maioria das categorias, sendo a maior parte

dos impactos causados pelos módulos fotovoltaicos, seguido da estrutura de montagem e, por fim, pelos inversores utilizados no sistema analisado.

Já Souliotis *et al.* (2018) realizaram em seu estudo uma ACV “*from cradle to grave*”, isto é, uma análise ACV que consiste em verificar os impactos da tecnologia em questão desde sua manufatura até o descarte. O sistema e tecnologias analisadas neste estudo foram mais simples, quando comparado aos sistemas utilizados nos estudos anteriormente descritos, sendo composto apenas por um coletor térmico, um painel fotovoltaico, tanques de água, incluindo a transmissão térmica, uma bomba de água e suas válvulas e o sistema de suporte utilizado para sustentação dos módulos no telhado. Apesar de mais simples, esse estudo viabiliza uma análise mais diretamente conectada ao ciclo de vida do módulo em si, por possuir menos instrumentos envolvidos. Souliotis *et al.* (2018) conclui, que na parte do sistema fotovoltaico, a etapa de fabricação industrial dos *wafers* de silício, por utilizar de calor excessivo, termina por ser a etapa responsável por influenciar a maioria das categorias de impacto (ex.: mudanças climáticas, cancerígenos e respiratórios), e faz com que a etapa de manufatura do sistema utilizado seja considerada a mais agressiva para o meio ambiente.

4.3 Conclusões da Análise ACV

Konzen (2020) indica que a elaboração de um estudo de ACV de um produto necessita de um conhecimento detalhado acerca de todos os processos envolvidos, e por ser composto de diferentes agentes ao longo de seu ciclo de vida, a análise pode vir a se tornar algo complexo. Dessa forma, os valores específicos podem e tendem a variar de acordo com o sistema utilizado como base, e a abordagem à metodologia, assim como os pontos analisados durante a avaliação. Entretanto, realizar a análise de sistemas tão diferentes possibilita traçar uma tendência da tecnologia.

Após analisar diversas ACVs realizadas, é possível compreender que, de forma agrupada, a principal etapa que impacta o meio ambiente é a da manufatura, com a produção e montagem dos painéis e demais estruturas utilizadas em sistemas fotovoltaicos, fato corroborado por diversos autores como Pupin (2019) e Konzen (2020). Após a manufatura, a etapa mais nociva ao ambiente, entretanto, seria o descarte dos materiais, seguido pelo transporte dos equipamentos e por fim, pelo período de utilização da tecnologia, por ser uma produção de energia de fonte renovável.

Desse modo, pode-se considerar que a melhor forma de melhorar o cenário da ACV e diminuir as emissões dos painéis fotovoltaicos ao longo do seu ciclo de vida, seja o investimento e a busca por novos modelos de sistema de geração, de modo que sejam mais eficientes, duradouros e projetados de forma a tornar a gestão de fim de vida mais prática e eficiente (KONZEN, 2020). O desenvolvimento neste setor, entretanto, não iria abranger os sistemas fotovoltaicos já em utilização, sendo, portanto, necessário também o investimento na etapa de fim de vida e gestão residual dos painéis, até porque, como supracitado neste trabalho, devido ao crescimento acentuado do mercado de energia solar, bem como o aumento exacerbado em um curto espaço de tempo da quantidade de sistemas fotovoltaicos, pode-se esperar e prever que o problema com descarte apropriado

das tecnologias envolvidas seja, da mesma forma, repentino com muitos módulos e sistemas se aproximando do final do seu tempo de vida útil em uma mesma época.

5. DESAFIOS DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2016), estima-se que até o ano de 2050 serão descartados ao redor do mundo cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis solares. Considerando o crescimento acentuado do mercado de energia solar nos últimos anos, pode-se ainda inferir, que esse descarte ocorrerá também de forma acentuada e repentina. Os painéis de energia solar fotovoltaica descartados são classificados na mesma categoria que o lixo eletrônico, o que se torna mais um empecilho para gestão de resíduos, pois significa que se faz necessário o emprego de tecnologias mais avançadas. Cerca de 70% do lixo eletrônico mundial era destinado à China até o ano de 2018, quando foi promulgada uma lei chinesa que proíbe o recebimento de qualquer resíduo proveniente de outras nações (BLUVISION, 2018).

Nesse contexto, percebe-se que ainda não existe uma uniformidade quanto ao tratamento de resíduos fotovoltaicos, havendo divergências quanto às tecnologias utilizadas, leis, sistemas de monitoração, e até mesmo investimentos governamentais, com cada país buscando dentre seus recursos e instituições a melhor forma de gerenciar o descarte de seus módulos. Deste modo, existe a necessidade de se analisar os métodos, as políticas e práticas de gestão de resíduos utilizadas por diferentes nações, de forma a construir o melhor caminho a ser tomado pelo Brasil no setor, analisando não apenas as regulamentações adequadas, como também a viabilidade econômica, pois ao se tornar um mercado lucrativo, a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos se torna mais estimulante tanto para empreendedores das grandes indústrias, como para pesquisadores (FINGER, 2019).

5.1 Gestão de Resíduos Fotovoltaicos no Brasil Atual

No Brasil, segundo a LEI Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, a gestão de resíduos fotovoltaicos é delimitada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que por sua vez é coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente, em conjunto com o Sisnama, ANA e o IBAMA. De acordo com a PNRS, os fabricantes e importadores dos módulos, são os detentores da responsabilidade na implementação de sistemas de logística reversa, isto é, a responsabilidade de garantir a coleta, transporte e destinação dos resíduos, seguindo as normas e regulamentações aplicáveis que estabelecem que os resíduos sólidos devem ser gerenciados de forma a garantir a proteção da saúde pública e do meio ambiente, promovendo a redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos. (BRASIL, 2010).

Entretanto, a gestão adequada dos módulos fotovoltaicos residuais ainda é um desafio no Brasil, devido à falta de infraestrutura e tecnologia para reciclagem e tratamento desses materiais em grande parte do território brasileiro, fazendo com que muitos desses módulos fotovoltaicos sejam descartados em aterros sanitários comuns, levando à contaminação do solo e recursos hídricos locais (OLIVEIRA *et al.*, 2018 apud KOZEN, 2020).

Para poder quantificar e estimar o crescimento na produção de resíduos de painéis fotovoltaicos, a IRENA (2016) criou uma metodologia com uma abordagem em três etapas, quantificando os resíduos de painéis fotovoltaicos ao longo do tempo (Figura 7).

Figura 7 – Abordagem para qualificar resíduos de painéis fotovoltaicos



Fonte: IRENA (2016)

A primeira etapa consiste em realizar a análise das tendências atuais e as futuras taxas globais de crescimento do setor. Em sequência, é realizada uma etapa para quantificar o volume médio de resíduos de painéis fotovoltaicos gerados durante as fases do ciclo de vida. Por fim, a terceira etapa do método consiste em projetar a quantidade de resíduos gerados, utilizando da função Weibull (IRENA, 2016).

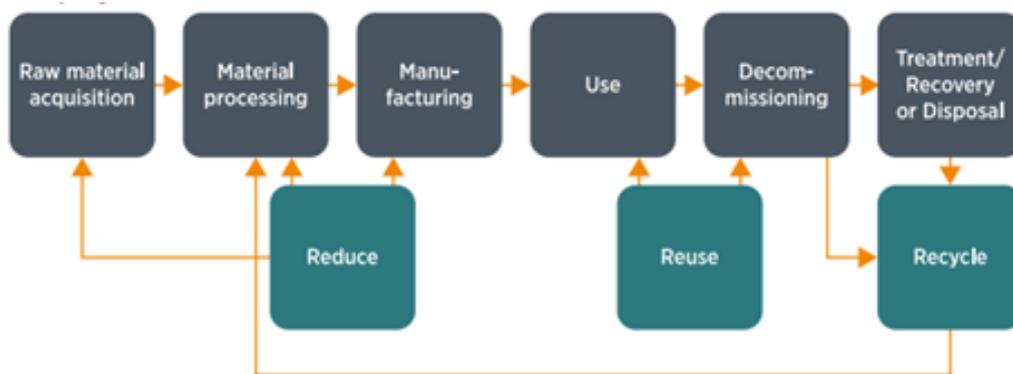
É necessário pontuar que na segunda etapa a capacidade fotovoltaica projetada (MW) é convertida em massa (Toneladas), tendo, portanto, uma razão média de massa de PV por capacidade unitária (t/MW) a ser calculada utilizando da média de dados disponíveis sobre o peso de painéis e a potência nominal, analisando dados típicos de painéis fornecidos pelos principais produtores (ANSELMO, 2019). Para realizar a estimativa dos resíduos de painéis já instalados, considera-se a média da potência instalada, e o peso dos tipos de painéis fotovoltaicos mais comuns dos principais fabricantes no intervalo de cinco anos passados (ANSELMO, 2019). É importante salientar que o modelo proposto pela IRENA (2016) desconsidera os resíduos provenientes da etapa de produção da tecnologia, por partir do princípio de que os resíduos de produção são facilmente gerenciados, coletados e tratados pelos próprios fabricantes dos módulos.

5.2 Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos

A estratégia mais popular a se pensar, quando se trata de uma problemática relacionada a resíduos sólidos, é o processo de reciclagem, que segundo a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve algum tipo de alteração das suas propriedades físicas, físico-químicas, ou biológicas, com o objetivo de obter novos produtos ou insumos (Figura 8). A reciclagem

é, portanto, um processo de transformação de resíduos em novos produtos materiais ou substâncias, que tem como objetivo a redução do impacto ambiental, e os custos associados à extração de matérias-primas “virgens”. Esse método de gestão de resíduos é utilizado para diversos tipos de materiais, com conceitos bem difundidos quanto aos resíduos residenciais derivados de plásticos, vidro, papel e metal, ao redor do mundo, porém, embora existam plantas e projetos piloto para reciclagem de módulos, o conceito de reciclagem no mercado fotovoltaico ainda não possui tamanha uniformidade mundial, sendo ainda restritos em termos de quantidade, eficiência e custo-benefício, além de por vezes ocasionar impactos ambientais durante seu processo (PRADO, 2018).

Figura 8 - Diagrama de fluxo do processo do círculo da vida para painéis fotovoltaicos e oportunidades resultantes para redução, reutilização ou reciclagem.



Fonte - Adaptado por Fthenakis (2000).

Para se tornar de fato um método de gestão de resíduos ideal, ou ao menos otimizado para implementação internacional, o processo de reciclagem da tecnologia fotovoltaica precisa avançar em três aspectos: regulamentação, tecnológico e financeiro. O primeiro item vem da importância de se ter incentivos e direcionamentos provenientes de órgãos governamentais que atuem na regulamentação e monitoramento de reciclagem de painéis antigos, deixando claro perante a lei, o responsável pela gestão, o caminho a ser seguido para gerenciar de forma correta o resíduo, e as penalidades caso sejam descumpridas as orientações. O aspecto tecnológico provém da pesquisa científica quanto aos procedimentos utilizados para reciclagem do material em questão. Os processos precisam ser bem definidos e difundidos, e comprovadamente efetivos quanto à diminuição de emissão de resíduos e aumento de benefícios para o meio ambiente. Por fim, é necessário que o mercado de reciclagem de painéis seja vantajoso no aspecto financeiro, tanto para atrair investidores e empresas para o mercado de reciclagem, com criação de indústrias especializadas e investimentos na área, como também para incentivar o desenvolvimento de pesquisas e de gestão pública.

5.2.1 Legislação

Apesar de não ser um processo regularizado e uniformizado, com diretrizes internacionais, a gestão de resíduos de painéis fotovoltaicos através da reciclagem ainda

é o principal meio estudado na área para diminuir os impactos ambientais que o descarte da tecnologia pode vir a causar, e o caminho mais provável a ser seguido durante os próximos anos para solucionar a iminente ameaça do fim da vida dos muitos módulos instalados nos últimos anos. Nesse cenário tem-se como referência as práticas de regulamentação da União Europeia, pioneiros quanto a restrições de descarte e diretrizes para reciclagem, nas quais as empresas relacionadas à cadeia de produção e comercialização de módulos fotovoltaicos implementaram os processos de reciclagem por acordos de responsabilidade ambiental (LATUNASSA *et al*, 2016).

No continente europeu, podemos destacar ainda a legislação alemã quanto ao mercado de resíduos fotovoltaicos, onde a Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos da Alemanha (ElectroG), lei que exige a coleta e reciclagem de equipamentos elétricos eletrônicos, foi estendida para abranger também a tecnologia dos painéis fotovoltaicos em meados de 2015. Essa prática legislativa já vem sendo utilizada como modelo por outras nações, e a tendência é que se torne um padrão global (ANSELMO, 2019).

No Brasil, o modelo planejado para os anos futuros é semelhante, utilizando a PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), descrita anteriormente, para monitorar e direcionar a gestão de resíduos das tecnologias em final de vida do mercado fotovoltaico, e da mesma forma responsabilizando as empresas relacionadas à cadeia de produção e manufatura dos módulos por essa gestão. Entretanto, diferentemente da Alemanha, o Brasil ainda não possui a infraestrutura para reciclagem que se tem presente no continente europeu. Além disso, a tecnologia fotovoltaica no Brasil é mais recente que no continente europeu, e, portanto, as práticas legislativas e de monitoramento quanto a tecnologia ainda não se encontram tão amadurecidas e difundidas, não tendo, portanto, a infraestrutura que seria necessária para fiscalização das empresas fabricantes na reciclagem dos resíduos.

5.2.2 Tecnologia

No aspecto residual, os dejetos dos painéis fotovoltaicos são classificados, conforme mencionado anteriormente, como lixo eletrônico, e os desafios presentes na prática de reciclagem são, portanto, semelhantes aos encontrados no gerenciamento de resíduos de equipamentos classificados como REEE, ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, sendo o principal desafio as rotas de processamentos economicamente viáveis (PRADO, 2018).

De forma geral, o processo de reciclagem de módulos fotovoltaicos passa por:

- **Desmontagem:** Nesta etapa, os módulos são desmontados para separação das diferentes camadas de materiais presentes.

- **Separação:** Os materiais constituintes dos módulos fotovoltaicos, desmontados previamente são separados por meio de processos como trituração, peneiramento, separação magnética e demais processos mecânicos, uma vez que os métodos utilizados nas próximas etapas variam de acordo com as classes dos materiais.

- **Purificação:** Os materiais são purificados por meio de processos químicos para remover impurezas e contaminantes. Nessa etapa, o processo utilizado pode diferir, de acordo com a classificação do material.
- **Reciclagem:** Os materiais são reciclados, e transformados em novos produtos finais, como vidro, alumínio ou silício reciclados.

De forma mais específica, os processos variam de acordo com o tipo de módulo, e os materiais envolvidos em sua construção. Existem soluções bem testadas em processos de separação e recuperação de módulos c-Si, e para tecnologias CdTe, mas quanto às demais tecnologias, ainda se faz necessário maior desenvolvimento e pesquisa (ANSELMO, 2019).

Seguindo as etapas gerais, o primeiro e segundo passo são semelhantes para as duas tecnologias, e têm como objetivo separar primeiramente a caixa de junção da estrutura de alumínio (c-Si), e posteriormente separar o vidro do módulo elétrico. Para os módulos c-Si é, geralmente, utilizado do processo de pirólise para aquecer o módulo até 600°C para decompor o encapsulante orgânico, e facilitar no processo de separação (ANSELMO, 2019). Em sequência, o vidro separado manualmente é enviado para uma instalação de reciclagem de vidro, assim como demais materiais, como fio de cobre e a armação de alumínio, separadas previamente ao processo de pirólise, enquanto às pastilhas de silício são processadas, seja para polimento e reutilização da pastilha, ou na criação de uma nova pastilha (Figura 9), e o plástico presente é queimado durante o tratamento térmico, onde os resíduos podem ser enviados a um aterro.

Figura 9 - Esquema do processo para reciclagem dos módulos fotovoltaicos c-Si.

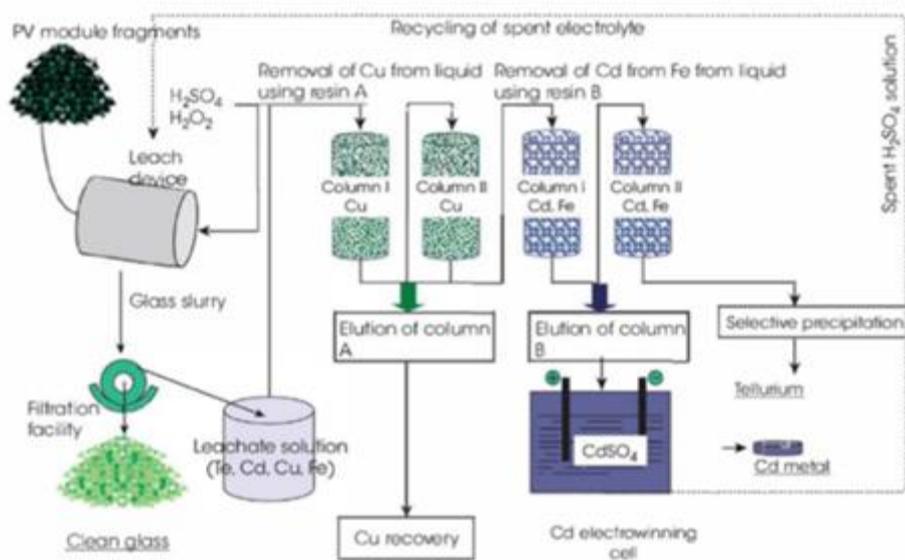


Fonte: Fthenakis (2018)

A reciclagem dos painéis CdTe (Figura 10) passa por processos mais avançados, baseados em uma tecnologia de hidrometalurgia ecológica e de custo mais acessível,

desenvolvida pela empresa First Solar e pela BNL (Laboratório Nacional de Brookhaven), onde os módulos são cortados e quebrados em pedaços pequenos por métodos mecânicos, em sequência expostos a lixiviação através de uma mistura diluída de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio que tem como finalidade extrair os metais e os elementos semicondutores. Por fim, se utiliza de uma coluna de troca iônica para separar os metais e semicondutores extraídos da solução. O resultado final é uma solução rica em telúrio, onde o Te é extraído por precipitação seletiva, enquanto o cádmio, separado como um material semiconductor previamente, é enxuto da coluna e recuperado eletroliticamente (FTHENAKIS; LYNN, 2018).

Figura 10 - Esquema do processo para reciclagem dos módulos fotovoltaicos CdTe.



Fonte: Fthenakis e Lynn (2018)

Além do desafio de eficiência na reciclagem, a tecnologia envolvida no processo deve também se atentar na quantidade de resíduos gerados. Etapas como a pirólise, que gera queima de materiais, ou resíduos a serem descartados, devem ser analisadas e estudadas, uma vez que uma das funções da reciclagem é a de diminuir a poluição e agressão ao meio ambiente. Dentre as etapas mais desafiadoras nesse aspecto, vale mencionar a eliminação do EVA dos módulos fotovoltaicos, a qual é realizada majoritariamente pelo método de calcinação (PRADO, 2018). Durante essa etapa, ocorre a eliminação de compostos tóxicos durante a decomposição do EVA, bem como a formação de substâncias cancerígenas, como dioxinas e furanos, que podem ocorrer em situações com disponibilidade de átomos de cloro, carbono e oxigênio em contato com uma fonte de calor, além disso, há reportes de metais tóxicos como cádmio, prata, cromo, arsênio, cobre, chumbo e gálio, que podem ser emitidos para a atmosfera durante a etapa de calcinação quando o procedimento de retenção, filtro e eliminação de gases emitidos no processo não é bem feito (PRADO, 2018).

5.2.3 Financeiro

Em escala industrial, a reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda é recente (PRADO, 2018). Isso acontece, pois, para uma tecnologia chegar à escala industrial, se faz necessário a viabilização econômica do procedimento, para ser atrativo a investimentos público e privado, e até o presente momento, o mercado de reciclagem de módulos ainda não é atraente no aspecto internacional, devido à falta de legislação específica na maior parte do mundo, ao volume atual de resíduos, e aos processos utilizados.

A falta de uma legislação internacional, não passa a estabilidade e confiança do mercado para o investimento de empresas. O volume de resíduos, uma vez que a tecnologia solar ainda é recente em boa parte dos países, faz com que não haja até o momento demanda que justifique o investimento, não havendo a matéria prima que viria a ser utilizada para gerar lucro. Os processos por sua vez são também relativamente novos, com tecnologias novas, pesquisas, profissionais, processos e procedimentos ainda não tão comuns, o que torna o custo elevado, enquanto a tecnologia ainda em desenvolvimento indica que o processo ainda deve amadurecer, com a tendência a ser otimizado nos próximos anos e com isso, trazer resultados financeiros melhores, desencorajando o investimento atual.

Dentre as iniciativas existentes, destacam-se as empresas First Solar, SolarWorld, e SASIL S.p.A. Sendo as duas primeiras presentes em território alemão, que é atualmente o país líder em reciclagem de módulos fotovoltaicos com uma taxa de reciclagem superior a 90% (IRENA, 2018).

A First Solar é uma empresa americana que produz e recicla módulos de filmes finos em CdTe. A empresa possui plantas de reciclagem em território americano e alemão, e recicla cerca de 90% de todos os seus módulos comercializados, utilizando-se do sistema de logística reversa. A empresa consegue recuperar até 90% do vidro, 95% dos materiais semicondutores e 80% do telúrio, com uma pureza de 99,7%, presentes em seus módulos reciclados (PRADO, 2018).

A SolarWorld por outro lado é destaque na reciclagem de módulos de silício cristalino, utilizando da calcinação a 600°C e de purificação por fresagem química em seu processo, e conseguindo recuperar 90% do vidro e 95% do semicondutor (PRADO, 2018).

A SASIL S.p.A. por sua vez é uma empresa italiana, com uma planta em escala piloto instalada para reciclagem de módulos c-Si, que tem como diferencial a utilização do processo de FRELP (*Full Recovery End-of-Life Photovoltaic*) que consiste na utilização tanto de processos mecânicos quanto químicos na etapa de separação (PRADO, 2018). A empresa opera com capacidade de 1 t/h e 8000t/ano, e reportou a marca de recuperação de 94% de prata, 99% de cobre, 95% de silício metálico, 99% de alumínio e 98% de vidro (PRADO, 2018).

No Brasil a empresa SunR Reciclagem Fotovoltaica, localizada no estado de Santa Catarina, se destaca como a primeira empresa brasileira de reciclagem de material fotovoltaico, e uma das pioneiras também na América do Sul, e utiliza da logística reversa no seu serviço, se responsabilizando pela coleta, processo, seleção e reciclagem dos

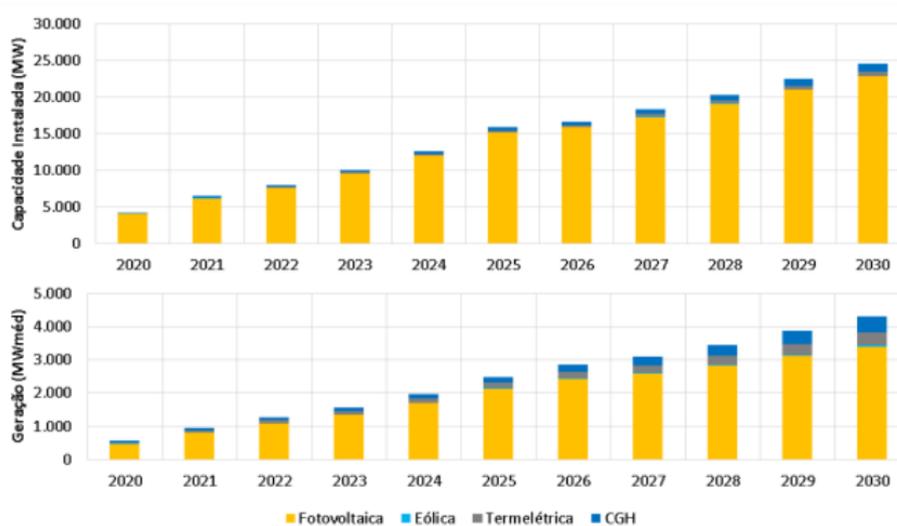
materiais. A informação obtida sobre os processos utilizados pela empresa, até então, é de que ela é capaz de processar qualquer tipo de módulo, por não utilizar processos químicos nem térmicos, e promete alcançar uma eficiência na reciclagem dos materiais de até 92%.

5.3 Estimativa da produção de resíduos sólidos no Brasil

Nesta seção é apresentada uma estimativa da produção de resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos com base no procedimento desenvolvido pela IRENA (2016), e dados de geração e potência instaladas no Brasil.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indica em seu Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 uma expansão de referência, considerando incertezas existentes em todo o processo de planejamento, resultando num crescimento da geração fotovoltaica distribuída no Brasil de aproximadamente 23.250 MW (potência esperada) em 2030 (EPE, 2021), conforme a Figura 11.

Figura 11 - Projeção da expansão em capacidade e em energia da Geração Distribuída

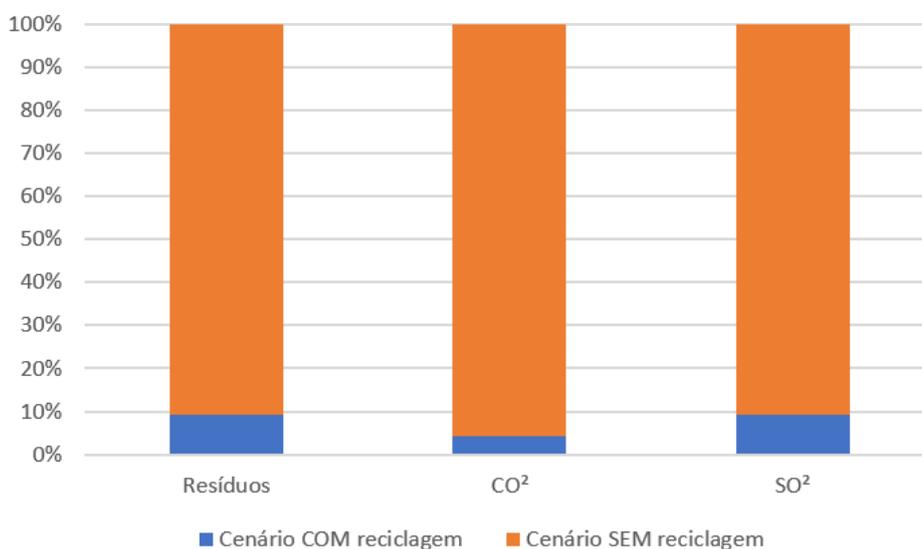


Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, EPE, 2021.

Assim, utilizando a relação de resíduos por potência (t/MW), empregada pela IRENA (2016) em sua metodologia, é possível estimar a produção de aproximadamente 356.500 toneladas de resíduos fotovoltaicos sendo produzidos no mercado de geração distribuída no Brasil, até o ano de 2030, para o cenário sem a inclusão de processos de reciclagem, ou qualquer outro tipo de eliminação de resíduo. Assumindo para esse cenário sem eliminação de resíduo que o processo de gestão pós vida dessa tecnologia seja realizado através de aterros, tem-se que de emissão seria de 82 kg de CO_2 e 0,29 kg de SO_2 para cada 1000 kg de painéis fotovoltaicos c-Si aterrados (LIU; ZHANG; WANG, 2020), dessa forma, o total de emissão de gases esperado na gestão residual desse cenário equivalente a 29.233.000 kg de CO_2 e 103.385 kg de SO_2 .

Entretanto, assumindo um cenário de reciclagem bem empregada e aplicada de forma geral, utilizando de dados experimentais que apontam que o processo de reciclagem de sistemas fotovoltaicos pode, de forma geral, alcançar um resultado de cerca de 90% de eficiência (TAWALBEH *et al.*, 2021), haveria, portanto, uma diminuição de 328.950 toneladas de resíduo, reduzindo a expectativa de produção de resíduos para 36.550 toneladas. Do ponto de vista de emissões, a aplicação de processos de reciclagem apresenta ainda a possibilidade de reduzir cerca de 42% dos gases de efeito estufa emitidos (KLUGMANN-RADZIEMSKA; KUCZYNSKA-LAZEWSKA, 2020), dentre os quais se enquadra o CO_2 . Dessa forma, a quantidade de gases emitidos diminuiria para 1.348.695 kg de CO_2 e 10.599,5 de SO_2 . Uma redução em 95,4% das emissões de CO_2 e 89,75% de emissões de SO_2 (Figura 12).

Figura 12 - Projeção de impactos ambientais para cenários da GD em 2030 com e sem reciclagem de resíduos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.4 Filosofia Low Tech Aplicada ao Mercado Fotovoltaico

Para além da busca por soluções da gestão residual, para se alcançar uma melhora na sustentabilidade da tecnologia, é necessário também voltar os olhos para o processamento envolvido em todo o ciclo de vida do material, pois a partir da manufatura que se tem uma facilidade, ou não, para o momento de reciclagem e descarte. Pensando dessa forma, existem estudos com um olhar voltado para as técnicas e fundamentos utilizados no momento de manufatura e gestão dos painéis fotovoltaicos, dentre eles, estudos sobre a aplicação da filosofia Low Tech aplicada aos módulos.

Com origem e raízes em movimentos ambientalistas que criticam o modelo de desenvolvimento tecnológico e econômico baseado no crescimento contínuo e na exploração dos recursos naturais, a filosofia Low Tech surgiu como uma resposta à

crescente dependência da sociedade em relação às tecnologias de alta complexidade, que acarretava o consumo desenfreado de recursos naturais. A filosofia Low Tech na atualidade já vem sendo aplicada em diversas áreas, como a agricultura, a arquitetura, o transporte e a energia, com a ideia de valorizar a simplicidade, durabilidade e potencial de reparo e adaptação das tecnologias, promovendo uma transição para uma sociedade mais sustentável e equilibrada.

Segundo Philippe Bihouix em seu livro “*The Age of Low Tech*”, o conceito de Low Tech refere-se à utilização de tecnologias simples, acessíveis, duráveis, reparáveis e adaptáveis, isto é, tecnologias que permitam uma maior autonomia e resiliência local, além de um menor impacto ambiental e social quando comparadas às tecnologias de alta complexidade que precisam ser constantemente repostas (BIHOUIX, 2014). O autor argumenta ainda que o desenvolvimento de tecnologias de alta complexidade é insustentável a longo prazo, e não resolvem os principais desafios globais, como a mitigação das mudanças climáticas, a preservação de recursos naturais e a redução da desigualdade (BIHOUIX, 2014).

Ao contrário do que o nome leva a parecer, a filosofia Low Tech não se trata de ser contra tecnologias modernas, mas sim sobre o nível de rotatividade dessas tecnologias, conectadas com a exploração constante de recursos naturais, para produzir produtos para uma sociedade sempre consumindo e trocando de tecnologia, gerando, portanto, uma quantidade de resíduos maior do que seria necessário, caso essas tecnologias fossem utilizadas até o final da vida útil das mesmas.

Um exemplo de tecnologia combatida pela filosofia Low Tech é o mercado de smartphones, que possui modelos novos saindo de fábrica e incentivando consumidores a trocarem seus aparelhos por novos antes do que seria necessário. Essa “*obsolescência programada*”, como é chamada, já rendeu multas de 5 milhões de euros para a Samsung, 10 milhões de euros para a Apple em 2018, quando a Agência Italiana de Defesa dos Consumidores (AGCM) aplicou as primeiras multas contra a obsolescência programada com a justificativa de que as companhias usavam atualização de softwares para diminuir o desempenho de seus smartphones e promover a necessidade de uma reposição por um modelo mais novo (VALENTE; CORONATO; CASTRO, 2020). Além das multas, a AGCM exigiu ainda que as empresas assumissem publicamente a culpa em seus sites italianos. No mesmo ano, em 2018, o Parlamento Europeu aprovou uma resolução no mês de agosto solicitando normas sobre a obsolescência programada e definindo regras de durabilidade na União Europeia para eletrodomésticos como máquinas de lavar roupa, de lavar louça e geladeiras, que entrariam em vigor no mês de abril de 2021 (VALENTE; CORONATO; CASTRO, 2020).

Philipps, Sager e Haines (2020) fazem uma análise do potencial e dos desafios da abordagem da filosofia Low Tech na produção de painéis fotovoltaicos mais sustentáveis, abrangendo áreas diversas, como a inclusão de materiais de baixo custo, fabricação simplificada, aumento da vida útil e reciclagem de materiais. Os autores examinam uma ampla gama de abordagem da filosofia, incluindo células solares de filme fino, módulos de células solares orgânicas e dispositivos híbridos e questões como o desenvolvimento, durabilidade e estabilidade dos dispositivos e a escalabilidade de produção dos módulos low tech (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020).

Dentre os resultados encontrados, têm-se que os módulos Low Tech, devido à baixa tecnologia e simplificação dos materiais e processos de fabricação, apresentam um custo por watt significativamente menor do que os módulos comerciais, tornando-se até 20 vezes mais baratos, e com uma pegada de carbono bem mais baixa, com uma estimativa de cerca de 20kg CO_2 , diante dos 60 kg CO_2 estimados na fabricação de células de silício cristalino, apresentando portanto uma pegada de carbono até 3 vezes menor que a dos módulos tradicionais (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020). Em contrapartida, os módulos solares de baixa tecnologia apresentaram uma vida útil mais curta, entre 5 e 10 anos de atividade, enquanto os módulos comerciais possuem uma estimativa de 25 anos (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020). No quesito de eficiência de produção de energia, os módulos de mercado também se mostraram mais eficientes, com um valor de eficiência típica entre 15% e 22% para células de silício cristalino, enquanto a eficiência de das células de filme fino é tipicamente inferior a 10% (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020).

Os autores concluem que, embora as abordagens de baixa tecnologia para a produção de módulos fotovoltaicos apresentem desafios significativos, elas também oferecem oportunidades promissoras para a produção de módulos fotovoltaicos mais sustentáveis e acessíveis, sua vida útil mais curta ainda seria suficiente para fornecer um retorno sobre o investimento em muitos casos (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020). Embora os módulos solares de baixa tecnologia geralmente tenham uma eficiência menor do que os módulos convencionais, eles ainda podem fornecer energia suficiente para atender às necessidades básicas em áreas sem acesso à rede elétrica, e a baixa tecnologia utilizada possibilita a produção local, o que pode reduzir ainda mais os custos e melhorar a acessibilidade em áreas mais remotas, e apesar da eficiência mais baixa, os módulos ainda são capazes de fornecer energia para iluminação, carregamento de dispositivos móveis e outras necessidades básicas (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020).

O artigo sugere que o desenvolvimento contínuo de abordagens de baixa tecnologia pode ajudar a tornar a energia solar mais amplamente disponível e contribuir para a transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, e que para alcançar o verdadeiro potencial dos painéis solares Low Tech, é necessário ainda a pesquisa e o desenvolvimento para melhorar sua eficiência, durabilidade e confiabilidade, o que poderia envolver a utilização de novos materiais, como o perovskita ou materiais orgânicos, e a incorporação de novos designs (PHILIPPS; SAGER; HAINES, 2020).

Os resultados obtidos pelos autores não são o suficiente para que se possa defender a utilização das tecnologias alternativas analisadas, em lugar das tecnologias atualmente utilizadas nos painéis fotovoltaicos comerciais, devido a menor eficiência e tempo de vida. Entretanto, a filosofia low tech não se trata exclusivamente desses processos e tecnologias específicos, e sim em uma ideologia que busca opções cada vez mais sustentáveis, atentando para a gestão residual, desde o momento de manufatura e seleção de matéria prima utilizada. Outros modos de utilizar a ótica Low Tech para buscar métodos de manufatura, e materiais que facilitem a gestão pós vida da tecnologia fotovoltaica, reciclagem e reutilização da matéria prima devem ser encorajadas, pelo objetivo da filosofia em obter processos mais conscientes no aspecto ambiental, para alcançar uma sociedade cada vez mais sustentável.

Dessa forma, a filosofia Low Tech, se aplicada à tecnologia fotovoltaica de forma eficiente, apresentaria o potencial de reduzir os custos envolvidos nos processos, ao utilizar materiais menos sofisticados na fabricação de módulos, que seriam por sua vez, mais acessíveis, o que acarretaria um menor impacto ambiental, além de facilitar a manutenção e reparação dos sistemas de energia solar mais simples, trazendo com isso a possibilidade de prolongar a vida útil do sistema (HOFFSCHIMIDT, 2010). Além de diminuir os resíduos nos processos de fabricação, a filosofia também pode facilitar o processo de reciclagem da tecnologia, diminuindo assim os custos no procedimento e na gestão de resíduos de final de ciclo de vida do sistema. A tecnologia de módulos fotovoltaicos orgânicos poderia ser vista como uma aplicação da filosofia Low Tech quando se consideram os baixos custos potenciais dos processos de produção, as menores quantidades de materiais fotovoltaicos (filmes finos) e as características desses materiais (orgânicos) considerando-se os processos de reciclagem. Entretanto, cabe um estudo mais aprofundado sobre o tema já que a vida útil dos módulos de Silício é consideravelmente grande quando comparada à vida útil de materiais eletrônicos e de filmes finos fotovoltaicos.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A partir da revisão bibliográfica realizada, fica evidente a necessidade e demanda pela gestão de resíduos fotovoltaicos em um futuro próximo no Brasil, justificado principalmente pelo aumento acentuado da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos em um breve espaço de tempo nos últimos anos, além da expectativa de que se mantenha crescendo nos anos seguintes.

A falta de um planejamento para gestão de resíduos adequada ocasionaria num grande impacto ambiental, o qual deve-se evitar antecipando e estudando a problemática previamente. Uma das formas mais comumente utilizadas quando se deseja ter uma melhor visão do potencial impacto que uma tecnologia pode vir a causar é o método da Avaliação do Ciclo de Vida.

Como indica Konzen (2020), numa análise geral, uma das principais dificuldades na elaboração de uma ACV é a falta de dados e contatos com diversos profissionais que poderiam vir a fornecer. Dessa forma, nessa pesquisa a análise utilizada é realizada a partir da compilação de dados experimentais realizados em diversos outros estudos, onde podemos encontrar como resultado que a produção do painel em si é a etapa de maior impacto no ciclo de vida do painel fotovoltaico.

Entretanto, apesar de não ser a etapa de maior impacto, a gestão dos resíduos em final de vida ainda é uma etapa com considerável influência, ainda mais quando estamos falando de uma tecnologia já empregada no mercado, onde a mudança no processo de manufatura não alcançaria influência nos produtos já implementados, e os processos utilizados para gestão de resíduos ainda não estão maduros ou estáveis no ponto de vista de larga escala no Brasil.

Diante dos problemas expostos, o desenvolvimento do processo de reciclagem se mostra necessário, com experiências prévias e sucesso na gestão do mercado europeu, é o processo mais próximo de uma solução concreta para a gestão de painéis fotovoltaicos em fim de vida, e já possuindo modelos de leis e regulamentações que podem ser implementadas para auxiliar na efetivação do processo.

Pensando mais a frente, porém, a reciclagem pode não ser a única saída utilizada. Uma vez que a ACV demonstra que a etapa de maior impacto ambiental é a da manufatura, e que o método de montagem e materiais utilizados na produção dos módulos são as maiores dificuldades na gestão de resíduos, deve ser buscado também soluções que diminuam esse impacto no início do ciclo de vida, e que possam auxiliar no processo de gestão residual.

Dessa forma, a aplicação da filosofia Low Tech é uma ideia que merece atenção, pois embora as abordagens de baixa tecnologia para a produção de módulos fotovoltaicos apresentem desafios significativos, elas também oferecem oportunidades promissoras para a produção de módulos fotovoltaicos mais sustentáveis e acessíveis. Obtendo assim um processo mais limpo na manufatura, com maior facilidade no desmonte e reciclagem, além de ter o potencial de fornecer uma solução de energia acessível, sustentável e

descentralizada, alcançando áreas sem acesso à rede elétrica, contribuindo para também para uma transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR, 2023. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05/04/23.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição PRODIST. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 30/03/23.

ANSELMO, Antonio Harley. Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida. **Monografia**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2019, 56 f. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/35049/1/RECICLAGEM%20OU%20DESTINA%C3%87%C3%83O%20FINAL%20DOS%20PAIN%C3%89IS%20FOTOVOLTAICOS%20APLICADOS%20EM%20GERA%C3%87%C3%83O%20DE%20ENERGIA%20AO%20FINAL%20DO%20CICLO%20DE%20VIDA%20_%20Monografia%20ANTONIO%20HARLEY%20ANSELMO_Com_Atta_R0.pdf. Acesso em: 28/03/2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040 - **Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida-Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 10004:2004 - **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR ISO 11704, A - **Sistemas fotovoltaicos** — Classificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2019.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR / PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZ --. 2.ed. -- São José dos Campos: **INPE**, 2017. 80p.: il. (E-BOOK). Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html Acesso em: 04/04/23.

BEIGELMAN, Bruno Boaventura. A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá. **Monografia** (Trabalho de Conclusão de Curso) – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013. xiii, 61 p.: Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007228.pdf>. Acesso em: 05/04/23.

BIHOUIX, Philippe. *L'Âge des Low Tech: vers une civilization techniquement soutenable*. 1ª ed. Editions du Seuil, 2014, 198p.

BLUEVISION. **Descarte de painéis solares pode ser problema no futuro próximo**. 2018. Disponível em: <https://bluevisionbraskem.com/inovacao/descarte-de-paineis-solares-pode-ser-problema-no-futuro-proximo/> Acesso em: 06/04/23.

BLUMENSCHNEIN, R. N.; MILLER, K. B. Inmetro. Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função Inmetro. Disponível em:

http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentacoes/3.pdf
Acesso em: 21/03/ 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: palácio do Planalto. 2010b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 27 abr. 2023.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *PV Life Cycle Analysis Managing PV Assets over an Uncertain Lifetime*. **Solar Power International**. 2016. Disponível em: https://www.re-plus.com/wp-content/uploads/2016/09/N253_9-14-1530.pdf Acesso em: 05/04/23.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE 2030)**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 05/04/23.

ESKEW, John; RATLEDGE, Meredith; WALLACE, Michael; GHEEWALA, Shabbir H. *An environmental Life Cycle Assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand*. Elsevier, **Renewable Energy**, v. 123, p. 781-792, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118301897>. Acesso em: 15/03/2023.

FINGER, Daniela Negri. Impactos Ambientais e Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Painéis Fotovoltaicos. 2019. **Monografia**. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/29479/1/PB_COELT_2019_2_07.pdf. Acesso em: 15/04/23.

FLICK, U. **Desenho da pesquisa qualitativa**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FU, Y.; LIU, X.; YUAN, Z. *Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China*. **Journal of Cleaner Production**, 11. 2014. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614007859 Acesso em: 28/03/23.

FTHENAKIS, V. M. *End-of-life management and recycling of PV modules*. **Energy Policy**, v.28, p. 1051-1058, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421500000914>. Acesso em: 29/03/2023.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H.C. *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. **Solar Energy**, vol. 85, Issue 8, Pages 1609-1628, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002345>. Acesso em: 05/05/2023.

FTHENAKIS, V. M.; LYNN, P. A. **Electricity from Sunlight: Photovoltaics Systems Integration and Sustainability**, 2nd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2018; ISBN 97811-18963807. - 2 ed. [S.l.]: Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2018.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 1999.

_____, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª edição. São Paulo: Atlas, 2002.

GUIMARÃES, E. C.; LEMES, T. V. D. S.; COSTA, W. H. A.; REIS, A. K. C. **Energia solar paradigmas e geração de resíduos**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.6, p.59923-59940 jun.2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/31485/pdf>. Acesso em: 06/04/23.

HOFFSCHMIDT, B. W. Low-tech solar PV systems for remote communities in developing countries. **Solar Energy**, v. 84, n. 8, p. 1461-1470, Aug. 2010.

IMHOFF, J. Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2007. 146 f. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8608/JOHNINSONIMHOFF.pdf?sequencia=1&isAllowed=y> . Acesso em: 05/04/23.

IRENA. *End-of-Life Management for Solar Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*. Report IEA-PVPS T12-10, 2018. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photosvoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf. Acesso em: 25/04/2023.

JUNIOR, A. F.; MORAIS, R. M.; EMERENCIANO, S. V.; PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. **Conceitos e Aplicações de ACV no Brasil**. In: XXVII Congresso Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, PR. 9.p. 2007. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0195.pdf . Acesso em: 22/03/23

KEELER, Marian. BURKE, Bill. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010, 368p.

KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa; KUCZYŃSKA-ŁAŻEWSKA, Anna. *The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts*, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 205, 2020, 110259. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0927024819305884?token=8446683D35A65F614197904F33395A6B6A65BDD717C766833081ED5D33DD9F0EFA50BC5A020EC1B281CE4F128EC402BF&originRegion=us-east-1&originCreation=20230505220229>. Acesso em: 05/05/2023.

KOZEN, Bárbara Anne Dalla Vechia. Avaliação do Ciclo de Vida de painel fotovoltaico [manuscrito]: análise dos impactos ambientais e fim de vida em estudo de caso no sul do

Brasil - 2020. 127 f.: il. **Dissertação** (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/39197/3/2020-DISSERTACAO-BARBARAKONZEN.pdf>. Acesso em: 01/04/2023.

LATUNUSSA, C.; MANCINI, L.; BLENGINI, G.; ARDENTE, F.; PENNINGTON, D. *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2016. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783>. Acesso em: 10/04/23.

LIU, Caijie; ZHANG, Qin; WANG, Hai. *Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China*. **Waste Management**, vol. 118, 2020, p. 491-500, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20305006>. Acesso em: 05/05/2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica** - 5. ed. - São Paulo: Atlas 2003.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico** – UPSOLAR. 2023. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-upsolar>. Acesso em: 04/04/23.

OLIVEIRA, Adriana de Souza. Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica. **Dissertação de Mestrado** em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM 268/2017. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília- DF 77p. 2017 Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/31252/1/2017_AdrianadeSouzaOliveira.pdf Acesso em: 02/04/23.

PORTAL SOLAR. **Dados do mercado de energia solar no Brasil**. 2023 Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 25/02/23.

PRADO, P. F. A. Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos e Recuperação de Metais. **Dissertação** (mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo/SP, 2018, 136p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30012019-141410/publico/PedroForastierideAlmeidaPradoCorr18.pdf>. Acesso em: 20/04/23.

PUPIN, Priscila Carvalho. Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade federal de Itajubá, Itajubá, 2019, 124f. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1939/dissertacao_2019054.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 28/03/23.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 1999.

PHILIPPS, D., SAGER, J., HAINES, J. F. A. *Towards a sustainable photovoltaic module: A review of the potentials and challenges of low-tech approaches*. 2020, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, vol. 118.

SOULIOTIS, Manolis; ARNAOUTAKIS, Nektarios; PANARAS, Giorgos; KAVGA, Angeliki; PAPAETHIMIOU, Spiros. *Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications*. 2018, **Renewable Energy**, Elsevier, vol. 126(C), pages 708-723. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811830418X?via%3Dihub>. Acesso em: 28/03/23.

STEINER, Kátia Helena. Estudo sobre o Impacto Ambiental Decorrente da Utilização e Descarte de Placas Fotovoltaicas. **Monografia** (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão - SC, 2020, 47p. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/15334/1/Trabalho%20de%20Conclus%C3%A3o%20de%20Curso-%20VF.pdf>. Acesso em: 10/04/23.

TAWALBEH, Muhammad; AL-OTHMAN, Amani; KAFIAH, Feras; ABDELSALAM, Emad; ALMOMANI, Fares; ALKASRAWI, Malek. *Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook*. **Science of The Total Environment**, vol. 759, 2021, 143528, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720370595>. Acesso em: 05/05/2023.

TESKE, Sven; LINS, Christine; MUTH, Josche. **[R]evolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo**. 2. ed. São Paulo: Greenpeace, 2013. Disponível em: https://issuu.com/greenpeacebrasil/docs/sumario_relatorio. Acesso em: 10/03/23.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

VALENTE, P; CORONATO, M.; CASTRO, B. **Como lidar com o consumidor low tech**. Época Negócios, Editora Globo, 2020. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Mercado/noticia/2020/01/como-lidar-com-o-consumidor-low-tech.html>. Acesso em: 26/04/23.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: Sistemas isolados e conectados à rede**. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 224 p, 2015.

XU, Liang; ZHANG, Sufang; YANG, Mengshi; LI, William; XU, Jerry. *Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011-2016: A life cycle assessment approach*. **Journal of Cleaner Production**, v.170, p. 310-329, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617321273>. Acesso em: 28/03/23.

WECKEND, S, WADE, A, HEATH, G. *End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels*. IRENA and IEA-PVPS; 2016. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 05/04/23.