

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

GLAUBER SANDI MARTINS
GUILHERME DAIKI YUKIMITSU

**RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E
TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PARA
GERAÇÃO DE VALOR NA CADEIA E IMPACTOS
AMBIENTAIS**

CAMPINAS/SP
2024

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

GLAUBER SANDI MARTINS
GUILHERME DAIKI YUKIMITSU

**RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E
TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PARA
GERAÇÃO DE VALOR NA CADEIA E IMPACTOS
AMBIENTAIS**

Trabalho de Projeto Integrador IV apresentado por **Glauber Sandi Martins e Guilherme Daiki Yukimitsu**, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior Tecnologia em **Gestão de Energia e Eficiência Energética**, da Faculdade Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação e mentoria da **Prof. Dra. Doralice de Souza Luro Balan**.

CAMPINAS/SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca

M386r

MARTINS, Glauber Sandi

Reciclagem de painéis fotovoltaicos e tecnologias de recuperação de materiais para geração de valor na cadeia e impactos ambientais. Glauber Sandi Martins e Guilherme Daiki Yukimitsu.

Campinas, 2024.

54 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética – Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof. Dra. Doralice de Souza Luro Balan.

1. Módulos fotovoltaicos. 2. Reciclagem. 3. Energia. I. Autor.
II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 621.47

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG GEEE 24.1

GLAUBER SANDI MARTINS
GUILHERME DAIKI YUKIMITSU

**Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos e Tecnologias de
Recuperação de Materiais para Geração de Valor na Cadeia e
Impactos Ambientais.**


Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Energia e Eficiência Energética, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 25 de junho de 2024.


BANCA EXAMINADORA



Doralice de Souza Luro Balan
Fatec Campinas



Francisco Del Moral Hernandez
Fatec Campinas



Sandro Pinheiro de Assis Cosso
Fatec Campinas

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a DEUS por estar sempre nos motivando a sermos lutadores incansáveis na busca do conhecimento e crescimento profissional. A FATEC CAMPINAS por proporcionar-nos um ensino forte e de qualidade e uma experiência educacional única. A professora Doralice de Souza Luro Balan pela mentoria e por compartilhar seu conhecimento na área em Gestão Ambiental e Energia e Ambiente para ser possível prosseguirmos todo o processo e conseguir realizar todas as análises necessárias para o trabalho desenvolvido.

DEDICATÓRIA

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

Charles Chaplin

RESUMO

A utilização da energia solar através de painéis fotovoltaicos/módulos fotovoltaicos constitui uma fonte limpa de energia tem se consolidado ao longo dos últimos anos. Esta afirmação tem como base, na maioria dos casos, a consideração apenas da geração de energia elétrica pelo painel após a sua fabricação e instalação. Há impactos em uma série de atividades dentro do processo de fabricação e que devem ser considerados. Em conformidade da matriz energética do país onde estas atividades são desenvolvidas, uma quantidade maior ou menor de emissões de CO₂ ocorrerá, além de outros tipos de degradações ambientais. Desse modo, evidencia-se a necessidade de verificar, considerando-se a matriz energética do país onde o painel é fabricado e/ou reciclado, se é possível amortizar o gasto energético, as emissões de CO₂ e as degradações causadas por seu processo de fabricação. A metodologia desta pesquisa consiste em um estudo de revisão da literatura, de caráter descritivo e exploratório; por ser um tipo de pesquisa muito específica, ela assume a forma de um estudo de caso. Utilizando-se de ferramentas de gestão ambiental, tais análises de ciclo de vida, energética e do passivo ambiental, pode-se estudar estes impactos desde a origem do painel até o término de seu tempo de vida útil. Assim, complementar a verificação da capacidade do módulo em amortizar das emissões de CO₂, os impactos causados por sua fabricação, além de amortizar a energia elétrica gasta no processo. Se após a verificação, o painel ainda possuir tempo de vida útil para funcionar, ele poderá ser considerado como uma fonte limpa de energia. O objetivo da pesquisa foi realizar uma revisão sobre a produção e reciclagem dos módulos solares fotovoltaicos em seu ciclo de vida útil e respectivos impactos econômicos e ambientais. Como resultados foi possível fazer uma projeção de produção de resíduos, alertar para os impactos socioambientais causados por este crescimento, apresentar tecnologias de reciclagem e um levantamento simplificado dos dados relativos ao processo de análise de ciclo de vida e suas funções, o seu potencial de amortização do passivo ambiental gerado em sua fabricação, considerando todo o tempo de vida útil do painel fotovoltaico.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos, Reciclagem, Energia.

ABSTRACT

The use of solar energy through photovoltaic panels/photovoltaic modules constitutes a clean source of energy and has been consolidated over recent years. This statement is based, in most cases, on considering only the generation of electrical energy by the panel after its manufacture and installation. There are impacts on a series of activities within the manufacturing process that must be considered. Depending on the energy matrix of the country where these activities are carried out, a greater or lesser amount of CO₂ emissions will occur, in addition to other types of environmental degradation. Therefore, it is necessary to verify, considering the energy matrix of the country where the panel is manufactured and/or recycled, whether it is possible to amortize the energy expenditure, CO₂ emissions and degradation caused by its manufacturing process. . The methodology of this research consists of a literature review study, of a descriptive and exploratory nature; As it is a very specific type of research, it takes the form of a case study. Using environmental management tools, such as life cycle, energy and environmental liability analyses, these impacts can be studied from the origin of the panel until the end of its useful life. Thus, complementing the verification of the module's ability to amortize CO₂ emissions, the impacts caused by its manufacturing, in addition to amortizing the electrical energy spent in the process. If, after verification, the panel still has useful life to function, it can be considered a clean source of energy. The objective of the research was to carry out a review of the production and recycling of photovoltaic solar modules in their useful life cycle and their respective economic and environmental impacts. As a result, it was possible to make a projection of waste production, highlight the socio-environmental impacts caused by this growth, present recycling technologies and a simplified survey of data relating to the life cycle analysis process and its functions, its amortization potential. of the environmental liability generated in its manufacturing, considering the entire useful life of the photovoltaic panel.

Keywords: Photovoltaic modules, Recycling, Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta de energia por fonte no mundo.....	16
Figura 2: Produção de energia por fonte.....	16
Figura 3: Previsão de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis do mundo até 2040, em TWh.....	17
Figura 4: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no ano de 2015	17
Figura 5: Componentes de um módulo fotovoltaico.....	20
Figura 6: Componentes de um módulo fotovoltaico.....	21
Figura 7: O ciclo de vida de um painel fotovoltaico.....	21
Figura 8: Impactos ambientais de um sistema com 1 kWp de potência em diferentes estágios.....	23
Figura 9: Evolução da capacidade instalada acumulada no mundo, em megawatts (MW).....	24
Figura 10: Distribuição das tecnologias fotovoltaicas em 2020.	25
Figura 11: Projeção de resíduos gerados provenientes dos módulos fotovoltaicos (em toneladas). 25	
Figura 12: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino ..	28
Figura 13: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe.....	29
Figura 14: A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV (Concept Vasilis Fthenakis)	29
Figura 15: Potencial da recuperação dos módulos fotovoltaicos até o ano de 2030	30
Figura 16: Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030	31
Figura 17: Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030	32
Figura 18: Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050	32
Figura 19: Sistema de logística reversa.....	34
Figura 20: Principais estágios do ciclo de vida de um produto.....	36
Figura 21: Tempo de Vida Ambientalmente Útil - TVAU, do módulo PV padrão, com 1m ² de área considerando os Fatores de Emissão, FE, dos GEE dos países ou locais de origem - FEO, e dos destinos – FED	46
Figura 22: Tempo de vida ambientalmente útil versus relação dos fatores de emissão de GEE entre os países de origem e de destino – FEO /FED.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do módulo analisado.....	41
Tabela 2: Levantamento do gasto energético da fabricação do módulo PV	41
Tabela 3: Conversão de alguns gases em kg eq - CO ₂	42
Tabela 4: Cálculo de emissão direta em equivalente de CO ₂ para a produção do módulo	42
Tabela 5: Composição dos fatores de emissão equivalentes em kg de CO ₂ /kWh para a matriz energética de diferentes países	43
Tabela 6: Total equivalentes de emissões de kg CO ₂ /kWh da fabricação do módulo PV para diferentes países.	44
Tabela 7: Emissões de CO ₂ Evitadas pelo módulo PV durante um ano de seu ciclo de vida – EE	45
Tabela 8: Tempo de vida ambientalmente útil (TVAU) do módulo PV após amortizações (emissões de CO ₂ , energia de fabricação e passivo ambiental).....	46
Tabela 9: Valores de Tempo de Vida Ambientalmente Útil- TVAU para o módulo PV Padrão para a relação FEO/FED	47

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BrasilSINT	Sistema Interligado
BrasilSISO	Sistema Isolado
CA	Corrente Alternada
DDE	Departamento de Desenvolvimento Energético
ED	Emissões Direta
EE	Emissões Evitadas
EI	Emissões Indireta
ElectroG	Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrnicos da Alemanha
EPBT	Energy Pay-Back Time
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ET	Emissões Totais
EU	Europa
EVA	Acetato-vinilo de etileno
FE	Fator de Emissão
GD	Geração Distribuída
GEE	Gás de efeito estufa
GEM	Gasto de Energia do Módulo
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Normas Brasileiras
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PV	Photovoltaic
REEE	Resíduo de equipamentos eletroeletrônico
REN	Resolução Normativa

RLEC	Reverse Logistics Executive Council
TVAU	Tempo de Vida Ambientalmente Útil
UV	Radiação ultravioleta
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

LISTA DE SÍMBOLOS

Cd	Cádmio
CO ₂	Dióxido de Carbono
In	Indio
G	Giga
g	Gramma
Ga	Gálio
h	Hora
k	Kilo
kg	Kilograma
kWh	KiloWatt Hora
M	Mega
Se	Selênio
Si	Silício
Te	Telúrio
TWh	Tera Watt Hora
W	Watt
Wp	Watt Pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL	18
3.2	O MÓDULO FOTOVOLTAICO	19
3.3	DESAFIOS DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
3.4	IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	22
3.5	A IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM NO SETOR FOTOVOLTAICO	24
3.6	TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM	27
3.7	GERAÇÃO DE VALOR NA RECICLAGEM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	30
3.8	LOGÍSTICA REVERSA	33
4	ESTUDO DE CASO: DA FABRICAÇÃO À DISPOSIÇÃO FINAL	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem ocorrido no mundo muitas mudanças comportamentais de ordem política e social. Entre estas mudanças, a escassez das reservas fósseis, o crescimento populacional e de consumo, aceleração tecnológica da humanidade, demanda crescente de energia para setor produtivo e transporte tem afetado de modo significativo o mercado da energia elétrica. -

A sustentabilidade é um dos temas mais debatidos na atualidade, com fóruns mundiais sobre medidas de preservação do meio ambiente, cuidados com a economia e com a sociedade, levou a que a atenção se voltasse para a utilização de fontes renováveis.

Neste cenário, houve 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 gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio da célula fotovoltaica, essa fonte é renovável e alimentada por recursos naturais abundantes e acessíveis (IMHOFF, 2007).

No Brasil, a geração de energia solar fotovoltaica é atualmente a segunda principal fonte do país, correspondendo a 12,6% da matriz elétrica brasileira (ABSOLAR, 2023).

Existem dois mercados de geração fotovoltaica no Brasil: o de geração centralizada, que com usinas de grande porte, e equivale a 8,367 GW da energia elétrica e, a geração distribuída (GD) que trata de sistemas residenciais e comerciais de pequeno porte, gerando cerca de 19,47 GW.

Segundo a ABSOLAR (2023), a previsão para o ano de 2023, para a geração solar fotovoltaica no Brasil é de crescimento de cerca de 10 GW alcançando a capacidade instalada acumulada de 34 GW na fonte, um crescimento de 52%. Estima-se que 21,6 GW serão provenientes do mercado de geração distribuída, enquanto os demais 12,4 GW serão de geração centralizada das usinas solares.

Do ponto de vista de sustentabilidade este panorama é ainda de apreensão, pois mesmo sendo uma fonte renovável de geração de energia e não produzindo emissão de gases, o sistema de geração solar fotovoltaico pode agredir o ecossistema do planeta.

A produção dos módulos pode gerar impactos negativos ao uso de recursos e danos à saúde humana. É relevante atentar à manufatura e ao descarte dos módulos solares após o seu tempo de vida útil, já que sua reutilização ou reciclagem precisa ser mais bem definida legalmente e tecnicamente (OLIVEIRA, 2017).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A manutenção da sociedade humana tem elevada dependência de energia e os governos das nações têm preocupações quanto ao adequado fornecimento de energia para o desenvolvimento. A oferta energética fica dependente, da matriz energética utilizada e sua rede de distribuição (SANTOS, 2009).

As energias não renováveis tradicionais, são passíveis de esgotamento como os derivados de petróleo, o carvão e o gás natural. Essas fontes de energia também são as responsáveis pela degradação ambiental causada na extração e problemas gerados em sua utilização. As energias renováveis são fontes que não se esgotam. Tidas como “energias alternativas” pela sua disponibilidade, garantia e seu menor impacto ambiental destacam-se a energia hidrelétrica, solar, eólica, biomassa, oceânica, geotérmica, entre outras (JARDIM, 2007).

Na situação do Brasil, tem-se um país privilegiado em termos de recursos naturais para aproveitamento energético. Essa característica faz com que o país tenha uma matriz energética majoritariamente “limpa” em comparação com os demais. Sua matriz energética é composta por mais de 70% de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 21,7% (MME, 2016).

As principais concentrações urbanas, utilizam do potencial hidráulico, mas que exige investimentos na expansão das redes de transmissão e distribuição, contribuindo para o aumento nos custos da energia elétrica. A expansão de outras fontes renováveis, como a energia solar, pode eliminar esta questão (TORRES, 2012).

A capacidade de aproveitamento da energia solar no Brasil é muito grande. As áreas do Nordeste brasileiro têm valores de radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões desérticas do mundo. (SALAMONI, 2009).

As cartas de radiação solar mostram que a radiação solar no Brasil varia entre 8 e 22 MJ/m²dia. No Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (PDE) a geração de energia elétrica fotovoltaica no Brasil, alcançará 7.000 megawatts (MW) até 2024 e representará quase 4% da potência total brasileira de 2024 (MME, 2015).

Destaca-se o potencial de crescimento da energia solar, que pode ser aproveitada de diferentes formas, incluindo a fotovoltaica. A tecnologia fotovoltaica se apresenta como uma tendência ideal para a geração de energia com possibilidade de geração distribuída. É um método de produção sustentável, trazendo benefícios ambientais e energéticos (RUTHER, 2012).

1.2 JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA

A energia renovável deve representar um equilíbrio não trazendo resultados negativos ao meio ambiente e a população

Dentre estas fontes temos a solar, onde estima-se que no futuro essa energia deva desempenhar um importante papel. A partir de dados extraídos do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019) as fontes renováveis ocupam 83,3% de oferta interna de eletricidade no Brasil.

A energia solar pode ser utilizada para diferentes finalidades como aquecimento e resfriamento de água, iluminação, coordenação de equipamentos entre outros.

A geração de energia elétrica, resulta da captação dos raios solares convertidos em corrente alternada (CA), e direcionada as redes de distribuição ou armazenados em baterias. Apesar de gerar uma energia limpa, alguns materiais utilizados nos módulos fotovoltaicos podem causar poluição.

As tecnologias para a reciclagem das chamadas placas, módulos ou painéis fotovoltaicos e estão sendo estabelecidas, pois que este tipo de material é considerado resíduo de equipamentos eletroeletrônico (REEE). O tratamento incorreto pode ser altamente perigoso, liberar toxinas, atingindo o meio ambiente e a saúde humana.

Segundo a Lei n 12.305, de 2 de agosto de 2010 (Brasil, 2010) que dispõe a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) a responsabilidade sobre o ciclo de vida dos produtos é compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e serviços públicos de limpeza urbana.

O artigo 30 da PNRS define o ciclo de vida do produto como “série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matéria e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final”. A responsabilidade é de todos os envolvidos na cadeia produtiva. Na PNRS o sistema de logística reversa normatiza que os resíduos perigosos devem ser gerenciados, incluindo pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes, produtos eletroeletrônicos.

O descarte correto das placas fotovoltaicas, conforme Coelho e Serra (2018) são resíduos perigosos de classe I.

Este trabalho de graduação visando ampliar os conhecimentos sobre a confecção e o destino de módulos fotovoltaicos, contribuindo em conhecimentos produzidos no curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética – Tecnólogo FATEC Campinas. Quanto a metodologia a pesquisa consistiu em um estudo de revisão de literatura, de caráter descritivo e

exploratório. Por ser um tipo de pesquisa muito específica, quase sempre ela assume a forma de um estudo de caso (GIL, 2008). O levantamento de dados foi efetivado através das plataformas digitais e em periódicos acerca do tema abordado.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sobre a produção e reciclagem dos módulos solares fotovoltaicos em seu ciclo de vida útil e seus respectivos impactos econômicos e ambientais.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

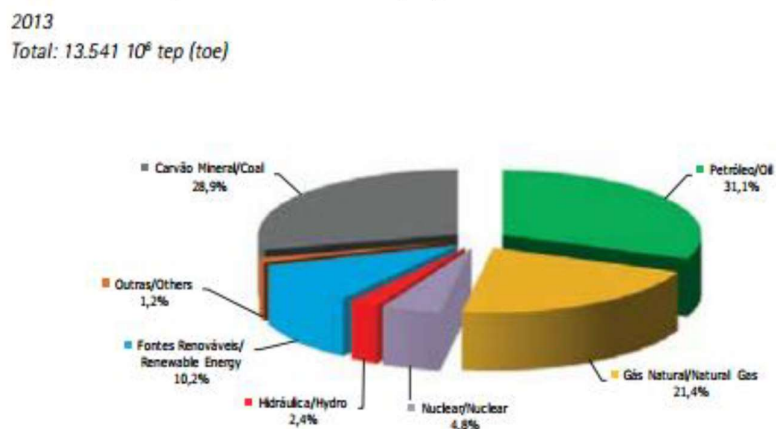
- Apresentar conceitos sobre a geração de energia elétrica e fotovoltaica;
- Apresentar a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e descarte eletrônicos;
- Apresentar os impactos ambientais gerados na fabricação e após o uso das placas fotovoltaicas;
- Analisar a capacidade de amortização dos custos energéticos, das emissões de CO₂ e do passivo ambiental gerados pela fabricação dos módulos fotovoltaicos, utilizando análise de ciclo de vida, levantamento de passivo ambiental, amortização e emissões de dióxido de carbono (CO₂),

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia elétrica movimenta o globo terrestre.

Na Figura 1 observa-se que a oferta mundial de energia por fonte em 2013 representada por 31,1% de petróleo, 28,9% de carvão mineral, 21,4% de gás natural e 10,2% de fontes renováveis.

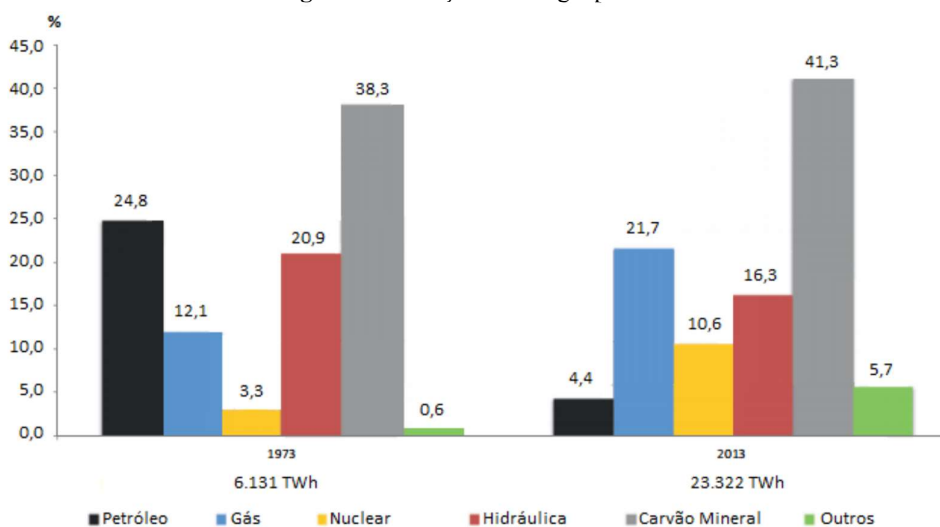
Figura 1: Oferta de energia por fonte no mundo.



Fonte: MME, 2016.

A geração de energia elétrica no mundo, em 2013, foi de 23.322 TWh, onde o carvão mineral gerou 41,3% do total, seguido pelo gás natural com 21,7%, a hidráulica com 16,3% e nuclear 10,6%. O petróleo e outras fontes foram responsáveis, respectivamente, por 4,4% e 5,7%, conforme ilustrado na Figura 2 (MME, 2016).

Figura 2: Produção de energia por fonte.

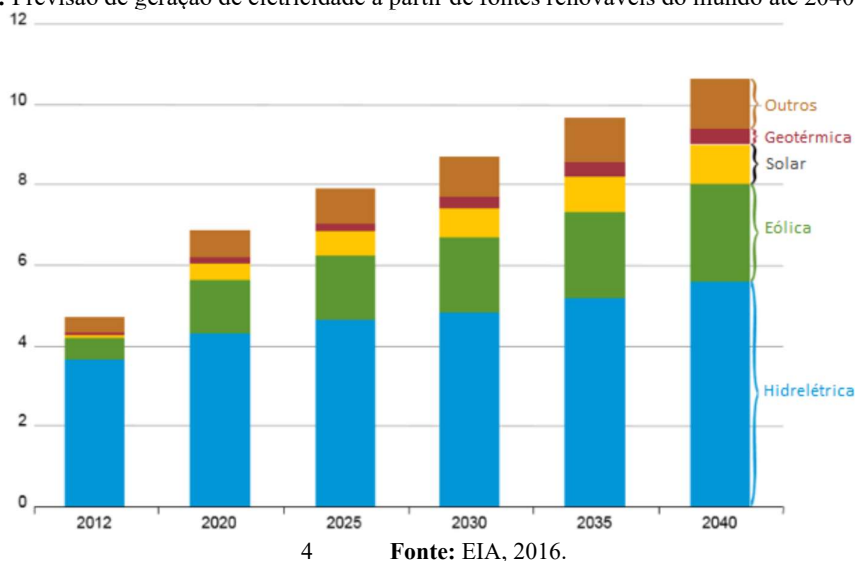


Fonte: MME, 2016.

Comparando 1973 e 2013 da Figura 2, observa-se uma alteração na distribuição das fontes para a produção energia elétrica; aumento oferta da energia nuclear, gás natural e carvão mineral, contrariamente a evolução do petróleo e da energia hidráulica. Neste quadro preocupante, associado aos estudos científicos que demonstram crescimento dos impactos causados pelos gases emitidos com a queima dos combustíveis fósseis. Há busca por fontes alternativas de produção de energia limpa e sustentável para reduzir a utilização dos recursos não renováveis.

A transição requer tempo, investimento e viabilidade econômica, mas as projeções mostram uma tendência para o aumento da oferta de energia renovável no mundo, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Previsão de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis do mundo até 2040, em TWh.

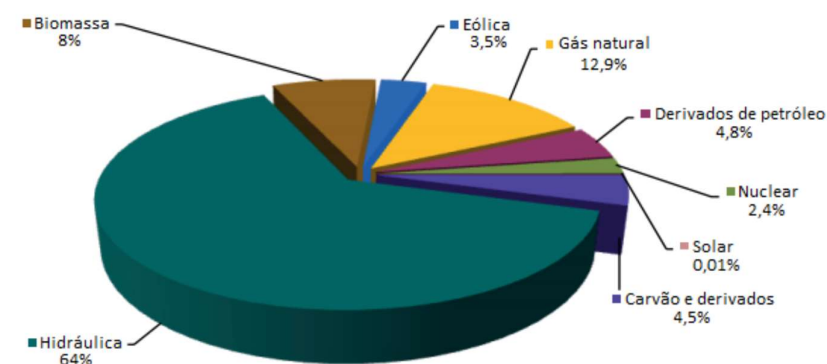


4 Fonte: EIA, 2016.

O Brasil possui a maior bacia hidrográfica do mundo, a oferta hidráulica reflete na produção de energia elétrica, através das usinas hidrelétricas.

Em 2015, a geração interna hidráulica respondia por 64% da oferta interna do país, conforme mostra a Figura 4 (MME, 2015).

Figura 4: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no ano de 2015.



Fonte: MME, 2015.

3.1 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Nos tempos correntes a presença de placas fotovoltaicas já é parte da arquitetura urbana e em grandes terrenos no interior. Ganhou visibilidade na paisagem e discussões sobre a implementação de painéis solares popularizaram o mercado de energia solar. Mas continua sendo nova no mercado para consumidores e empresários, amadurecendo paulatinamente.

A primeira hidroelétrica e a primeira termoelétrica brasileiras surgiram no final do século XIX, mas a primeira usina fotovoltaica no Brasil surgiu em 2011. Foi instalada em Tauá, Ceará. Contava com 4.680 painéis fotovoltaicos, com geração de 1 megawatt (BEIGELMAN, 2013).

Houve crescimento rápido e em 2012 ocorreu o primeiro marco regulatório da produção de energias alternativas, pela publicação da REN (Resolução Normativa) nº 482 da ANEEL, com vigência até hoje (MME, 2015).

A norma permitiu que o consumidor fosse capaz de gerar sua própria energia, conectada à rede de distribuição; viabilizou tanto a produção por micros geradores no telhado de residências, quanto por minigeração em Fazendas Solares. A norma também possibilitou a criação de sistemas de créditos energéticos e critérios necessários para a conexão de sistemas à rede. Instituiu incentivos do uso de energias renováveis, com isenção de IPI ou ICMS, apoio do BNDES, redução do Imposto de Importação, etc. , tudo com objetivo de fomentar o mercado de geração distribuída de energia solar no Brasil (MME, 2016).

Entre as principais medidas estão a Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL, regras para a micro e minigeração distribuída; a Lei 13.169/2015 instituindo o programa de incentivo à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, e a Resolução Normativa 819/2018, com regras para a geração compartilhada de energia solar.

Essas medidas intencionaram o crescimento da fonte em desenvolvimento, pela sustentabilidade que envolve essa fonte renovável de geração, e ao potencial para geração fotovoltaica de energia elétrica no Brasil. O local menos ensolarado do Brasil, gera mais eletricidade solar do que o mais ensolarado da Alemanha (MME, 2016).

No ano de 2012 produzia-se 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. O setor trouxe mais de 31 bilhões de reais em novos investimentos e gerou 180 milhões de empregos (ABSOLAR, 2023).

Em abril de 2021, a ANEEL (2024) estabeleceu novas regras para a geração de energia solar no Brasil, constituindo o novo marco legal da energia solar.

Com a nova resolução, ficou estabelecido que a partir de 2023, o valor pago pelos créditos de energia elétrica seria reduzido gradualmente. Em 2030 o subsídio seria eliminado, os consumidores geradores de energia solar em suas casas ou empresas, teriam menor atratividade financeira dos sistemas de geração distribuída. A nova resolução estabeleceu novas regras para o acesso de novos consumidores à geração distribuída e a criação de um sistema de cobrança de tarifas de uso da rede elétrica para os consumidores que geram energia solar.

O mercado solar segue a tendência atrativa e de crescer ainda mais nos próximos anos com incentivos, como linhas de financiamento e prazos de pagamento prolongados, juros mais baixos, diminuição do custo para aquisição de painéis solares (ABSOLAR, 2023).

Essa fonte relativamente nova de energia tem tecnologias em desenvolvimento com que módulos mais eficientes, mão de obra mais especializada e abundante, uma potência maior por metro instalado e mais indústrias que manufaturem equipamentos.

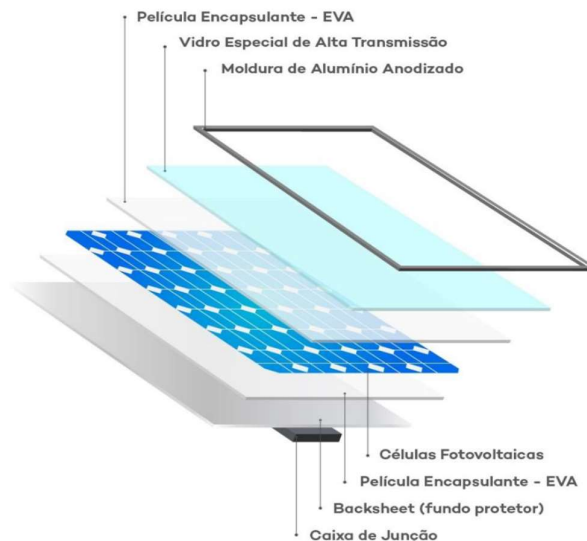
Teremos uma fonte mais eficiente, com tecnologias sempre atuais e maior acesso financeiro de aquisição.

3.2 O MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos solares, conhecidos como painéis solares ou placas solares são componentes de todos os sistemas de gerações fotovoltaicos.

Estes componentes possuem diferentes materiais em sua composição (Figura 5): as células fotovoltaicas; o vidro fotovoltaico (especial para a fabricação do painel solar); o filme encapsulante – EVA; o *backsheet* (Material plástico branco da parte posterior); a caixa de junção e a moldura do painel solar de alumínio anodizado (Frame do Painel Solar).

Figura 5: 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 e antirreflexivo custando 10% do da fabricação do painel solar (ABSOLAR, 2023).

O filme encapsulante para o painel solar, acetato-vinilo de etileno (EVA), é um material especial projetado para painéis fotovoltaicos, e se trata de um material selante para proteger as células fotovoltaicas contra o desgaste por raios UV, temperaturas extremas e umidade (ABSOLAR, 2023). Seu custo representa 8% do custo de fabricação do painel solar.

A caixa de junção é um equipamento onde as células fotovoltaicas estão interconectadas eletricamente. A caixa é fixada na parte de trás do painel solar e possui diodos de by-pass que vão garantir a segurança e o bom funcionamento. 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 representa aproximadamente 6% do custo de fabricação do painel solar (ABSOLAR, 2023).

Ao redor de um painel é uma moldura de alumínio anodizado adiciona robustez ao painel solar e garantir a sua integridade; representa aproximadamente 8% do custo dele (ABSOLAR, 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.

Os módulos podem ser compostos por diferentes tipos de materiais, porém, destaca-se que o silício faz parte de 95% dos módulos produzidos mundialmente.

Em sua maioria, os materiais de conversão fotovoltaica dos módulos são provenientes de materiais semicondutores (Figura 6) como o Silício, podendo ser na forma de mono cristalino, policristalino, ou filmes finos (STEINER, 2020).

Figura 6: Componentes de um módulo fotovoltaico

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%

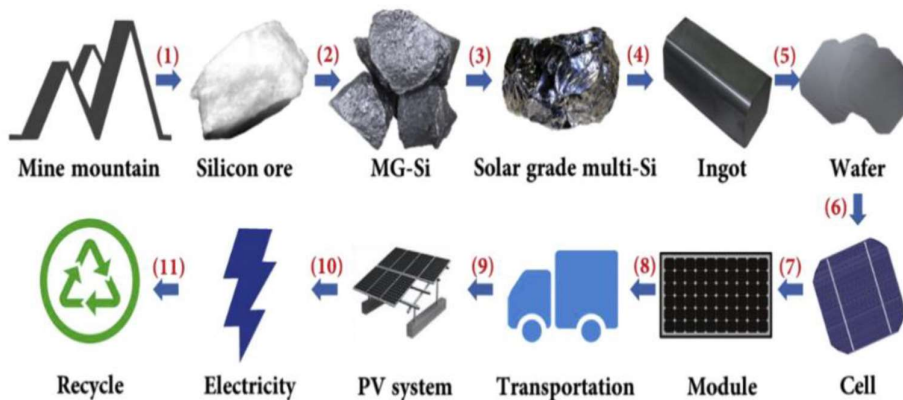
Fonte: Adaptado de IRENA, 2016

3.3 DESAFIOS DO DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2016), estimam em 2050 o descarte mundial de cerca de 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis solares.

Os painéis descartados são classificados na mesma categoria que o lixo eletrônico, tornando-se mais um obstáculo para gestão de resíduos. Cerca de 70% do lixo eletrônico mundial era enviado à China. Em 2018, foi promulgada uma lei chinesa que proíbe o recebimento de qualquer resíduo proveniente de outras nações (BLUVISION, 2018).

Figura 7: O ciclo de vida de um painel fotovoltaico



Fonte: Adaptação compilada pelos autores

Ainda não existe uma uniformidade quanto ao tratamento de resíduos fotovoltaicos, carecem melhorar as tecnologias utilizadas, leis, monitoração e investimentos governamentais. Estão ocorrendo ações em cada país buscando aprimorar o descarte de seus módulos. No Brasil transitam iniciativas de regulamentações adequadas, estudos de viabilidade econômica, estímulos logísticos para empreendedores das grandes indústrias e pesquisa e desenvolvimento (FINGER, 2019).

3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia solar é reconhecidamente uma fonte renovável, não se esgotando com o uso e podendo ser utilizada sem causar danos irreversíveis ao meio ambiente.

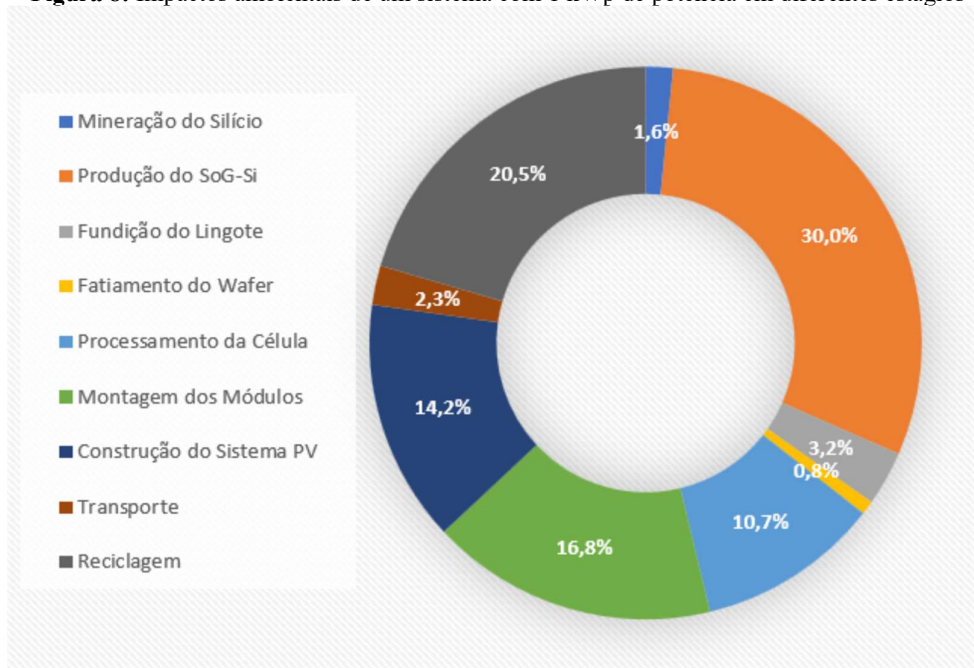
Contudo, sendo uma forma de geração de baixo impacto ambiental, considere-se que todos os processos humanos de geração de energia ocasionam algum impacto ao meio ambiente, e a geração fotovoltaica não é diferente.

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 e KIM, 2011)

Durante a produção, a fabricação de painéis solares envolve o uso intensivo de energia e matérias-primas, a extração de minerais e metais como silício, alumínio, cobre e prata. Esses processos podem gerar emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar, do solo e da água (FTHENAKIS e KIM, 2011).

Os impactos gerados na gestão de resíduos são menores que os impactos gerados na manufatura; a reciclagem é o processo menos nocivo. O período de pós vida do painel pode gerar emissões de gases, resíduos e até mesmo contaminação do solo e água, caso seja um descarte inadequado (KOZEN, 2020).

Figura 8: Impactos ambientais de um sistema com 1 kWp de potência em diferentes estágios



Fonte: Adaptado pelo autor

Os impactos ambientais do sistema de geração fotovoltaica, 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. Cerca de 22 deles são classificados como de baixo nível e 4 médio impacto, se faz necessário mais estudos para reconhecer o efeito real dos 6 impactos restantes (TAWALBEH et al., 2021).

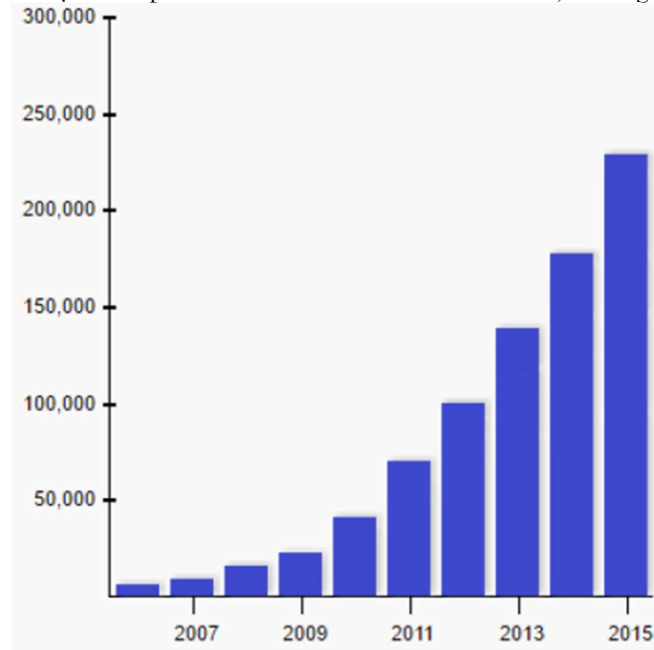
A pegada de carbono derivada da tecnologia dos sistemas de geração fotovoltaica está entre 14g e 17g de CO_2eq/kWh , dependente do tipo de tecnologia aplicada em sua fabricação (TAWALBEH et al., 2021).

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 permite quantificar impactos ambientais sendo importante para o aprimoramento de um processo produtivo, tomada de decisões, definições de prioridades, entre outros (OLIVEIRA, 2017).

3.5 A IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM NO SETOR FOTOVOLTAICO

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) a capacidade de geração de energia renovável aumentou em 8,3% ou 153 GW em 2015, representando a maior taxa de crescimento já registrada. Consideremos que a capacidade de geração instalada da usina de Itaipu é de 14 GW.

Figura 9: Evolução da capacidade instalada acumulada no mundo, em megawatts (MW).

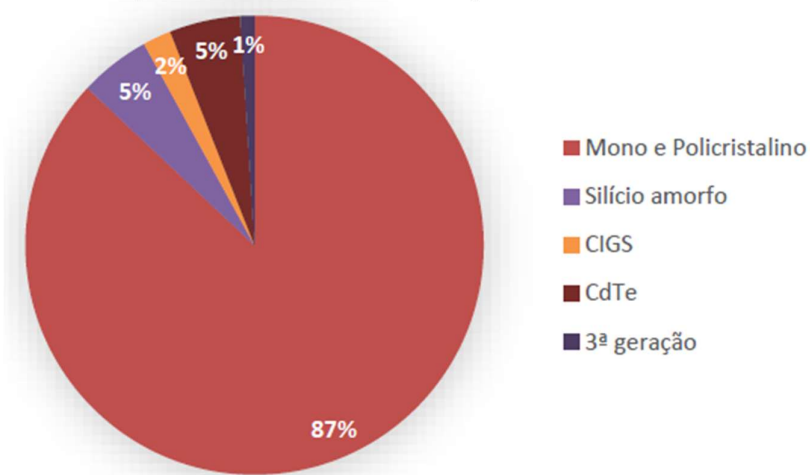


Fonte: IEA, 2014.

A Figura 10 ilustra a participação das tecnologias fotovoltaicas na produção dos módulos.

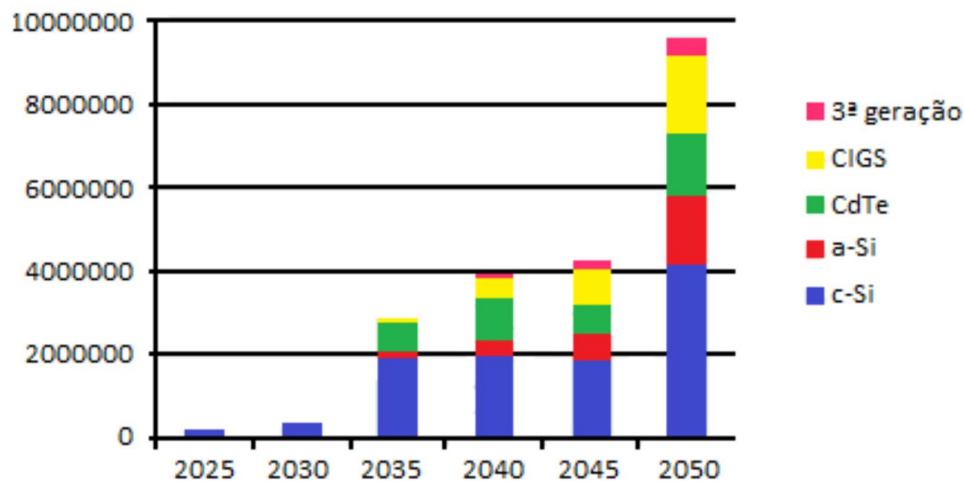
Na atualidade a tecnologia de silício cristalino (c-Si) é a mais tradicional, apresentando escala de produção superior a 85%, se consolidando no mercado fotovoltaico pela robustez e confiabilidade (IRENA, 2016).

Nos filmes finos e da 3ª geração, alguns dos elementos utilizados são altamente tóxicos (Cd, Se e Te) ou raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos, dificultando o uso mais intenso dessas tecnologias.

Figura 10: Distribuição das tecnologias fotovoltaicas em 2020.

Fonte: IRENA, 2011.

A Figura 11 projeta a tendência de que os módulos de silício cristalino sejam maioria na futura geração dos resíduos fotovoltaicos, baseada no consumo europeu (MONIER, 2011).

Figura 11: Projeção de resíduos gerados provenientes dos módulos fotovoltaicos (em toneladas).

Fonte: Adaptado de MONIER, 2011.

O principal problema destas quantidades de resíduos é que se não descartados corretamente e se não receberem o tratamento adequado, causarão impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde humana. A lixiviação de chumbo e cádmio, perda de vidro e alumínio, perda de metais raros (prata, índio, gálio e germânio) são parte do problema (MONIER, 2011).

O chumbo é um metal altamente tóxico, com elevado potencial de acumulação no meio ambiente e nos seres vivos. Uma vez alcançado o corpo humano, o chumbo se distribui em todo

o corpo e no sangue, podendo se acumular nos ossos, causando impactos negativos no sistema nervoso, imunológico, reprodutor e cardiovascular e no funcionamento renal. Ecossistemas que se encontram perto de fontes de chumbo demonstram uma gama de efeitos adversos, incluindo perdas na biodiversidade, diminuição das taxas de reprodução em plantas e animais e efeitos neurológicos em vertebrados (MONIER, 2011).

A problemática da lixiviação do chumbo está associada principalmente com a 1ª geração dos módulos fotovoltaicos, de silícios cristalinos. Há, aproximadamente, 12,67 g de chumbo contidos em um módulo fotovoltaico de silício cristalino (que pesa cerca de 22 kg), representando, por conseguinte, o potencial para a lixiviação de chumbo no ambiente entre 1,64 g e 11,4 g por módulo.

O cádmio também é classificado como um metal altamente tóxico que se acumula nos organismos vivos, com uma meia-vida biológica de 30 anos. Esse metal tem toxicidade aguda, bem como um elevado potencial de acumulação em seres humanos. Como agente cancerígeno estabelecido, o cádmio pode causar graves alterações fisiopatológicas em condições de exposição.

A lixiviação do cádmio é um risco específico da 2ª geração de painéis fotovoltaicos, os de filmes finos. Aproximadamente 4,6 g de cádmio estão contidos em um painel de CdTe (que pese cerca de 12 kg), representando, por conseguinte, o potencial para a lixiviação do cádmio no ambiente entre 0,32 g e 1,84 g por módulo.

Os recursos de alumínio e vidro constituem a maioria dos materiais utilizados na produção dos módulos fotovoltaicos, indicando que a perda de tais materiais, ocorre em todas as tecnologias fotovoltaicas.

Diante dos fatores mencionados anteriormente, decorre o grande desafio da energia solar para posicionar-se mundialmente como energia verdadeiramente limpa. Neste caso, é preciso ir além do processo de conversão da energia, apresentando alternativas para mitigar os impactos negativos que os resíduos gerados pelos módulos fotovoltaicos podem causar no ambiente.

A melhor solução para o problema diz respeito a reciclagem e a inserção destes resíduos na cadeia produtiva como matéria prima, gerando economia com a redução de custos e aumentando a competitividade dos novos produtos, além de poupar fontes de material ainda conservadas. A reciclagem e recuperação de vários materiais no fim de vida útil destes módulos podem ser utilizados, inclusive, para a fabricação de novos módulos fotovoltaico, reduzindo o uso de energia e as emissões relacionadas a extração da matéria prima (SCHMIDT, 2009).

3.6 TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM

O rápido crescimento da energia solar trás consigo os problemas de disposição de resíduos em futuro próximo; o fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos geraria uma quantidade significativa de resíduos.

O descarte de pequenas quantidades de módulos fotovoltaicos em aterros sanitários não deve causar riscos ambientais desde que se monitore a lixiviação. Em grande escala de implantação e descomissionamento, a reciclagem de módulos fotovoltaicos em fim de vida é preciso evitar riscos e recuperar materiais vantajosos. Na Europa, o setor fotovoltaico adotou uma abordagem proativa, com os regulamentação de resíduos de elétro – eletrônicos.

A Lei de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos da Alemanha (ElectroG) de 2015 foi estendida aos módulos fotovoltaicos e deve se tornar um padrão global. A legislação demonstra questões de custos e a complexidade de enfrentar este material em fim de vida. Podendo ser caracterizados como "perigosos", exigirá requisitos especiais para manuseio, descarte, registros e relatórios (UE, 2024).

Há soluções técnicas bem testadas de separação e recuperação para produtos c-Si e PV CdTe. O primeiro passo na reciclagem é separar as caixas de junção e as estruturas de alumínio. Depois ocorre a separação do vidro e do módulo elétrico. Nos módulos c-Si, o tratamento térmico queima os laminados para facilitar a separação (delaminação do módulo). Esta pirólise a 450-600°C decompõe o encapsulante orgânico. Nas várias etapas são separados: fio de cobre, armação de alumínio, vidro, silício e outros resíduos então enviados para os recicladores. O plástico é queimado durante o tratamento térmico e os resíduos vão para um aterro (FTHENAKIS, 2018).

A Figura 12 apresenta a delaminação quando acontece os separação manual do vidro e das pastilhas de silício reciclando em uma nova pastilha.

Figura 12: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino

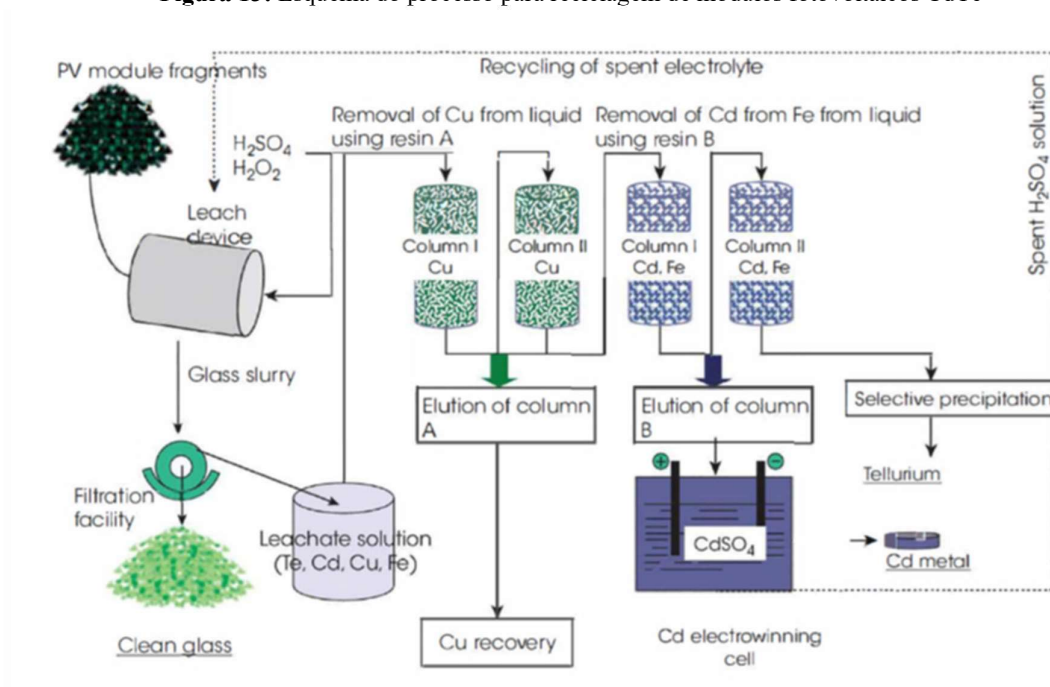


Fonte: Adaptado (FTHENAKIS, 2018)

Na descrição de Fthenakis (2018) os módulos são transportados para entrar no processo de reciclagem. Em seguida, são desmontados manualmente. Ocorre tratamento térmico e separação dos componentes; as células solares são tratadas quimicamente. As camadas de superfície e difusão são removidas posteriormente por etapas de limpeza. As células e a quebra do *wafers* são limpas por decapagem com ácido. Os “*String Boxes*” são processados por uma empresa de tratamento de resíduos e/ou sucata eletrônico; o plástico recebe tratamento térmico. Os resíduos vão para um aterro sanitário. O rendimento das células recuperadas depende do seu tipo, design e estado dos módulos a serem processados. A reciclagem dos painéis CdTe baseia-se em uma tecnologia hidro metalúrgica de baixo custo e ecológica; envolve travar os módulos, remover os filmes finos do substrato e recuperar seus materiais .

A Figura 13 mostra os módulos cortados por uma trituradora e quebrados em moinho de martelos. As peças são expostas à lixiviação com ácido sulfúrico diluído e peróxido de hidrogênio. A lixiviação extrai os metais e semicondutores. Emprega-se coluna de troca iônica para separar o cobre e o cádmio; a solução restante é rica em telúrio que será por precipitação.

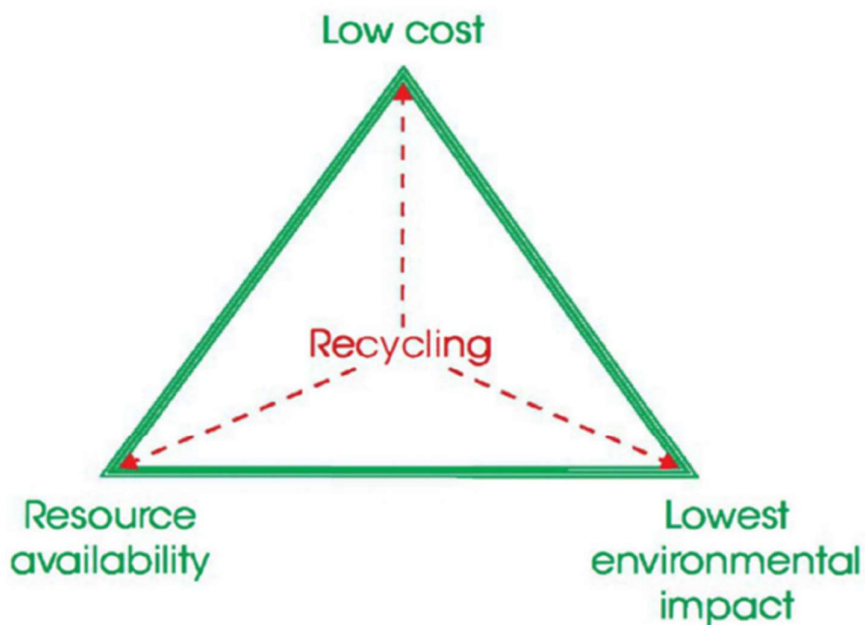
Figura 13: Esquema do processo para reciclagem de módulos fotovoltaicos CdTe



Fonte: Adaptado (FTHENAKIS, 2018)

Fthenakis (2018) considera que, a disponibilidade de recursos, a acessibilidade e os menores impactos ambientais possíveis são três pilares principais do crescimento sustentável da energia fotovoltaica e da transição energética.

Figura 14: A reciclagem fortalece os três principais pilares do grande crescimento sustentável dos PV (Concept Vasilis Fthenakis)



Fonte: Adaptado (FTHENAKIS, 2018)

A reciclagem de módulos fotovoltaicos abordando essas três dimensões está na Figura 14).

A reciclagem ajuda a evitar a escassez de tais materiais necessários para a produção e reduz o custo dos módulos fotovoltaicos.

Na Europa, a indústria fotovoltaica criou o PV CYCLE, um programa voluntário para reciclar módulos fotovoltaicos (www.pveyele.org, 2023). Esta abordagem de toda a indústria, para gerenciar economicamente a reciclagem em larga escala deve se tornar um componente essencial dos roteiros de redução de custos.

3.7 GERAÇÃO DE VALOR NA RECICLAGEM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Existem oportunidades para criação de valor em cada segmento da cadeia dos painéis fotovoltaicos. O estágio de final do ciclo de vida pode gerar renda.

As oportunidades estão relacionadas a reduções no uso de material, reparos, reutilização reciclagem e tratamento de resíduos de painéis fotovoltaicos.

Figura 15: Potencial da recuperação dos módulos fotovoltaicos até o ano de 2030.



Fonte: Adaptada da IRENA (2016)

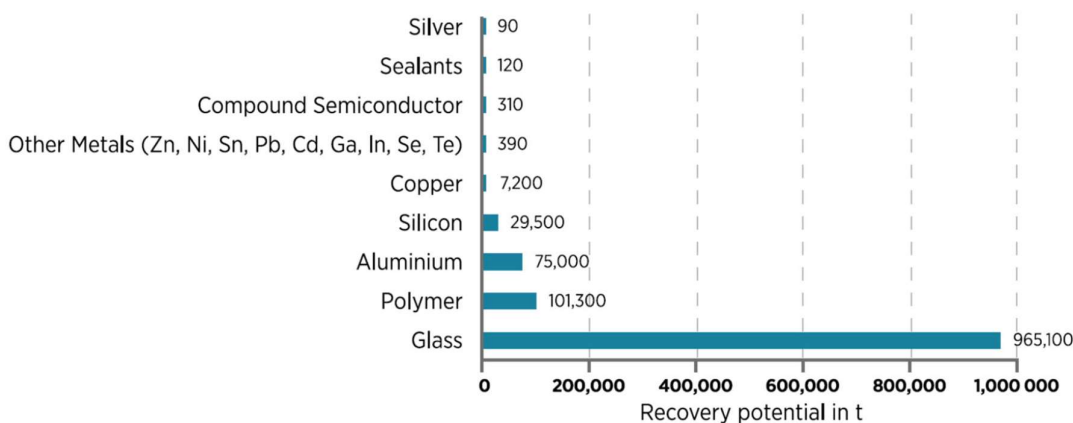
Estudos publicados pela IRENA (2016) afirmam que é possível criar um valor importante extraindo matéria-prima secundária dos painéis fotovoltaicos e disponibilizando-as no mercado. Com uma vida útil média de 30 anos, os painéis fotovoltaicos acumularão um grande estoque de matérias-primas incorporadas em produtos, por ex. prata, que não estarão disponíveis para recuperação por um período considerável.

As premissas de reaproveitamento de matérias primas: podem ser tratadas e recicladas a uma taxa de 65% a 70% em massa. As estimativas indicam o volume acumulado de 1,7 milhão de toneladas de módulos para 2030 no cenário de perda regular.

O único regulamento existente para reciclagem de painéis fotovoltaicos é a Diretiva WEEE da EU (EU, 2012) que: assume uma taxa de coleta de 85% do fluxo total de resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil; sugere tecnologias de tratamento e reciclagem de alto valor disponíveis.

Os resultados de possíveis matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030 são exibidos na Figura 16:

Figura 16: Matérias-primas acumuladas recuperadas até 2030



Fonte: Adaptada (IRENA: 2016)

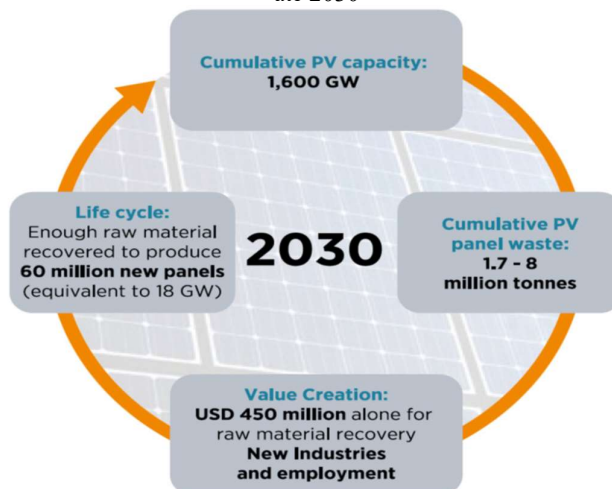
A Figura 17 mostra quantificação sobre o tema. O potencial valor total do material recuperado por tratamento e reciclagem dos painéis pode chegar em 2030 a US \$ 450 milhões até 2030. Isso equivale ao valor atual produzir 60 milhões de novos painéis ou 18 GW. Em comparação, 180 milhões de novos painéis foram produzidos em 2015.

Mais de 80% do peso dos painéis fabricados é vidro; a maior massa de material de reciclagem é estimada em 960.000 toneladas até 2030. Com seu preço médio de mercado de material secundário de US \$ 30-50/t, dependendo da qualidade da recuperação o valor de recuperação excede US\$ 28 milhões. Estima-se quantidades extensas de alumínio (em torno de 75.000 toneladas) e cobre (7.000 toneladas) sendo relançadas no mercado de materiais secundários. Seu valor combinado atual é de até US\$140 milhões (Eurostat Statistics, 2014).

Esses materiais oferecem um importante suprimento adicional de matéria-prima até 2030. As tecnologias cristalinas de silício continuam a dominar o mercado fotovoltaico. Sabe-

se que até 30.000 toneladas de silício, podem ser recuperadas até 2030, equivalente à quantidade de silício necessária para produzir 45 milhões de novos painéis. Na taxa de recuperação de 70%, a US\$ 20/kg seria gerado cerca de US\$ 380 milhões (EU , 2024).

Figura 17: Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2030



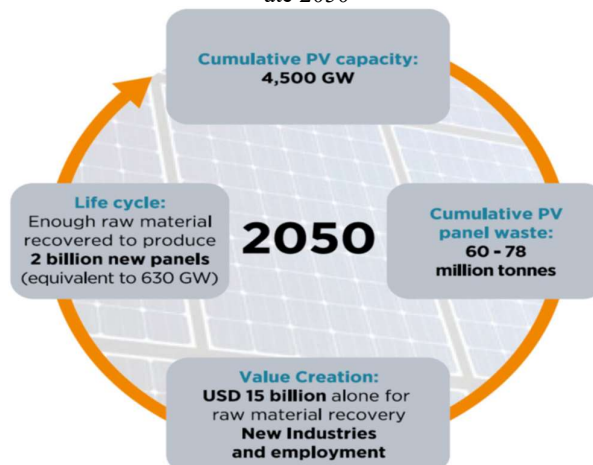
Fonte: Adaptada (IRENA, 2016)

Aplicando o mesmo cenário de perdas regulares até 2050, o potencial de valor das matérias-primas desbloqueadas deverá subir para mais de US \$ 15 bilhões, Figura 18.

Isso equivale à matéria-prima necessária para produzir dois bilhões de novos painéis - 630 GW.

A matéria-prima recuperada pode ser comercializada e evitar processos extrativos; a quantidade que retorna à economia permitirá a produção de novos painéis fotovoltaicos ou outros produtos.

Figura 18: Potencial criação de valor por meio do gerenciamento de fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos até 2050



Fonte: Adaptada (IRENA, 2016)

Se aumentada a segurança do suprimento futuro de fotovoltaicos ou outros produtos dependentes das matérias-primas utilizadas poderá resultar no rápido crescimento do volume de resíduos oriundos de módulos ao longo do tempo, assim, impulsionará o mercado de matérias-primas secundárias.

3.8 LOGÍSTICA REVERSA

Os primeiros conceitos de logística reversa surgiram no final da década de 70 e estão associados à preocupação com o meio ambiente.

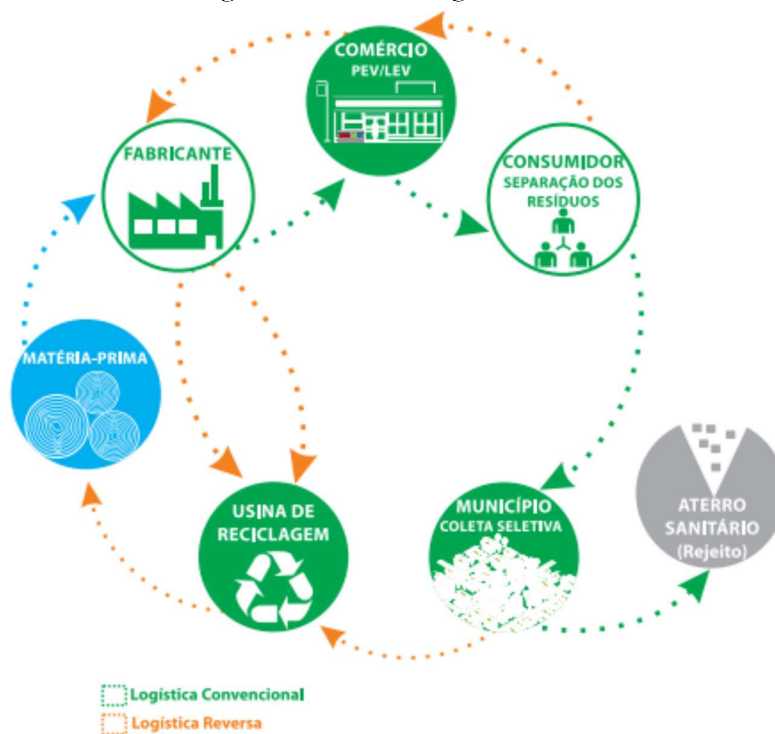
O Reverse Logistics Executive Council (RLEC), uma organização profissional não lucrativa, define a logística reversa de maneira mais ampla e detalhada:

“Logística reversa é o processo de movimentação de produtos da sua típica destinação final para outro ponto, com o propósito de capturar valor ou enviá-lo para o destino adequado. As atividades da logística reversa incluem processar a mercadoria retornada por razões como dano, sazonalidade, reposição, recall ou excesso de inventário; reciclar materiais de embalagens e reusar contêineres; recondicionar, remanufaturar e reformar produtos; dar disposição a equipamentos obsoletos; programa para materiais perigosos; e recuperação de ativos.” (FELIZARDO, 2005).

Esse processo logístico por meio da reciclagem, do reuso, da recuperação e do gerenciamento de resíduos, contribui para diminuir o uso de recursos não renováveis e reduzir ou eliminar resíduos que afetam negativamente o meio ambiente.

Lacerda (2002) afirma que por trás da logística reversa está o conceito da análise do ciclo de vida do produto, pois dentro da visão logística, a vida do produto não termina com sua entrega ao cliente final. Os produtos que se tornam obsoletos, danificados ou não funcionam devem retornar ao seu ponto de origem, para serem reciclados e descartados adequadamente. Portanto, o processo logístico reverso gera o reaproveitamento dos materiais ao processo tradicional de suprimento, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19: Sistema de logística reversa.



Fonte: MME, 2015.

O processo de logística reversa é composto por um conjunto de atividades que uma empresa realiza para coletar, separar, embalar e expedir itens usados, danificados ou obsoletos dos pontos de consumo até os locais de reprocessamento, revenda ou de descarte. Os materiais podem retornar aos fornecedores, revendidos, reconicionados, reciclados e reaproveitados no novo sistema logístico direto, ou quando não tiver nenhuma alternativa o destino pode ser feito a disposição final ambientalmente adequada (LACERDA, 2002).

A maior parte dos produtos que entram no fluxo de retorno seguem quatro processos principais. Primeiramente há o sistema de coleta, seguida de um processo combinado de inspeção, seleção e classificação. Na sequência, há um reprocessamento ou uma recuperação direta e finalmente uma redistribuição (BRITO e DEKKER, 2002).

A coleta diz respeito às atividades de recolhimento e deslocamento físico dos produtos usados disponíveis até um ponto de recuperação. À medida que os produtos vão sendo retornados, determina-se o melhor procedimento a ser feito para maximizar seu valor. Os produtos são examinados, têm sua qualidade verificada, e então, é decidido o tipo de recuperação ou reprocessamento a ser feito (CAMPOS, 2006).

A recuperação direta engloba o reuso, a revenda e a redistribuição. O reuso caracteriza-se pelo reaproveitamento de uma embalagem ou a venda de um produto retornado para um novo cliente, por exemplo. A revenda, por sua vez, descreve a condução do produto, de maneira como

está, para um mercado secundário. E a redistribuição é a realocação dos produtos (CAMPOS, 2006).

O reprocessamento envolve a transformação do produto já usado, com a finalidade de melhorar sua qualidade ou ampliar suas funções. Abrange ações como reparo, polimento, reciclagem, remanufatura e restauração.

Finalmente, a redistribuição é o processo de levar aos novos usuários os produtos reconicionados, realocando-os no sistema logístico direto. Em últimos casos, por motivos técnicos ou econômicos, o destino do produto retornado pode ser a disposição final ambientalmente adequada. Neste caso, o reprocessamento é reduzido, por exemplo, à incineração (CAMPOS, 2006) e disposição das cinzas.

Segundo Brito e Dekker (2002), as razões pelas quais os produtos entram no ciclo reverso podem ser determinadas por forças econômicas, legislatórias e vinculadas à responsabilidade social.

As razões econômicas estão relacionadas a todas as ações de retorno que as empresas usam para obter benefícios econômicos. Esses benefícios podem ter vantagens ligadas ao resgate de produtos usados (quando algumas partes são reutilizadas na fabricação de novos produtos), às ações de marketing (quando a empresa destaca a possibilidade de devolução, criando um diferencial competitivo perante seus concorrentes) e às ações de prevenção sobre futuras legislações (quando as empresas criam processos adequados ao que virá, reduzindo gastos e esforços para um futuro não muito distante (CAMPOS, 2006).

A legislação deverá estar relacionada às circunstâncias que obrigam companhias a recuperar seus produtos ao final da vida útil ou aceitá-los de volta. As empresas têm cada vez mais responsabilidade pelo destino dos produtos após a entrega aos clientes e pelo impacto produzido por eles no meio ambiente.

Por fim, a responsabilidade social está ligada ao conjunto de valores e princípios que companhias e organizações atendem para se tornarem de fato engajadas à logística reversa. Aliado a isso, o aumento da consciência dos consumidores contribui para que as empresas reduzam os impactos negativos de suas atividades perante o meio ambiente e à sociedade como um todo.

4 ESTUDO DE CASO: DA FABRICAÇÃO À DISPOSIÇÃO FINAL

As ferramentas de gestão ambiental permitem a percepção que investimentos na questão ambiental não são apenas custo, porém podem surgir como um bem rentável e válido.

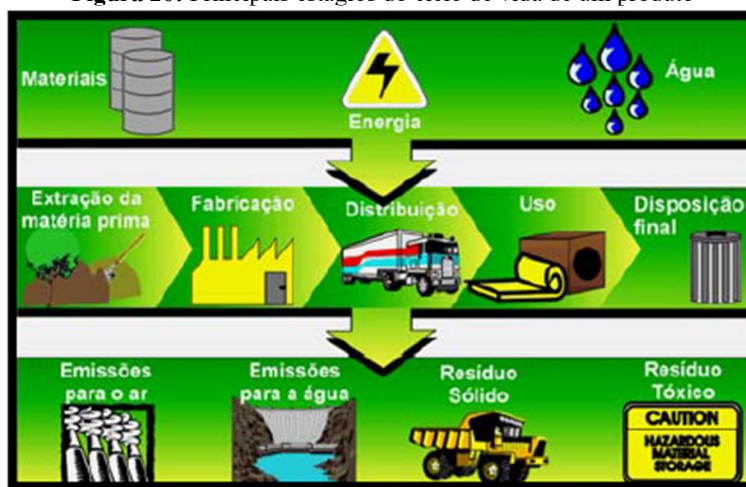
Entre as ferramentas utilizadas estão a análise do ciclo de vida e o levantamento do passivo ambiental, onde se associam a análise de amortização energética e das emissões de CO₂ do processo de fabricação do módulo PV.

Foram considerados neste estudo os aspectos de sua produção que causam as maiores cargas de passivo ambiental.

O levantamento foi limitado pelos dados na literatura sobre os processos de fabricação das células fotovoltaicas de silício, do alumínio para a moldura do painel, a bateria de chumbo-ácido e do vidro plano utilizado sobre a placa de células de silício do painel.

A análise de ciclo de vida (ACV) estuda os aspectos ambientais e impactos a eles associados ao longo de toda a sua cadeia de produção: desde a aquisição de sua matéria prima, uso até a disposição final. A ACV auxilia na identificação de oportunidades de melhoria nos aspectos ambientais do produto, na tomada de decisões e no “marketing” do produto ou processo. Esta técnica possui um conjunto de normas oficializadas pela Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT), as normas NBR ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, ISO 14047, ISO 1408, ISO 14049. A figura 20 mostra os principais estágios do ciclo de vida de um produto (OLIVEIRA, 2017).

Figura 20: Principais estágios do ciclo de vida de um produto



Fonte: Ometto (2005)

Para os painéis fotovoltaicos, a ACV foi limitada ao processo de produção da célula fotovoltaica, placa de vidro plano e a armação em alumínio, desde a extração de matéria prima e montagem.

A geração da eletricidade produzida pelo painel não emite nenhum tipo de poluição ou gás de efeito estufa - GEE, utilizando uma fonte renovável para funcionar. Porém, no seu funcionamento é necessário gastar energia para produzir e economizar energia. Este conceito, chama-se “amortização ou reembolso energético”, indica quanto tempo um sistema fotovoltaico tem que operar para gerar a mesma quantidade de energia gasta para sua fabricação, montagem, instalação e deposição ao final de sua vida útil.

Outro termo frequente neste tipo de análise é “Energy Pay-Back Time” (EPBT). Assim conhecida a quantidade de energia necessária para se produzir o painel, é possível referenciar as emissões de CO₂ de acordo com a quantidade de CO₂/kWh emitido pela fonte energética utilizada na produção dos módulos (OMETTO, 2005)

Conforme a matriz energética do país de origem a fabricação do painel pode-se mostrar mais ou menos vantajosa em termos de impacto ambiental e de emissões de GEE, assim como no país de destino onde este painel irá operar.

De acordo com Alsema & Nieuwlaar (1997) o EPBT é definido pela equação (1)

$$EPBT = ER = \frac{E_{utilizada}}{E_{economizada}}$$

Onde:

- EPBT = ER → Tempo de reembolso de energia
- Eutilizada → Contribuição de energia durante o ciclo de vida do módulo, da fabricação a deposição ao final da vida útil do equipamento.
- Eeconomizada → É a economia de energia devido à energia elétrica produzida pelo painel durante seu funcionamento por ano.

Com dados encontrados na literatura, foram consideradas as matrizes energéticas de quatro países: Brasil, Japão, Alemanha e Estados Unidos da América. No Brasil, dividiu-se em dois subsistemas, o Sistema Interligado (BrasilSINT) e Sistema Isolado (BrasilSISO), considerados respectivamente, menos poluente e mais poluente.

A análise energética compara o processo de produção de painéis fotovoltaicos entre os quatro países verificando qual a viabilidade em se fabricar painéis fotovoltaicos em países com

uma matriz energética similar à do Brasil ou, em comparação com países que tem uma matriz energética similar a dos países analisados.

Os resultados encontrados serão utilizados para verificar o equilíbrio energético, bem como o seu potencial de mitigação de CO₂ e sua capacidade em amortizar o passivo ambiental gerado por sua produção em seu ciclo de vida. Deve ser considerada também a existência de um custo ambiental associado ao uso da energia gasta em sua produção e que esta energia afetará a estrutura ambiental de produção dos módulos fotovoltaicos. Além disto, impactos ambientais são causados ao longo de toda a cadeia produtiva do painel.

Um fato a ser considerado é o de que para calcular os efeitos de mitigação de CO₂, se os limites utilizados pelo ciclo de vida do sistema alcançar apenas um nível nacional, os resultados podem se mostrar úteis dentro do processo nacional de mitigação de CO₂, mas podem não ser úteis para o processo de mitigação do conteúdo de gás carbônico da atmosfera em uma escala global. Quando a análise leva em conta um limite nacional é deixado de lado o fato de que os locais de produção e operação do módulo podem não ser os mesmos, principalmente quando se trata de um mercado global.

Os gastos específicos com energia elétrica para a produção do módulo fotovoltaico não variem de modo considerável para a maioria das instalações industriais na sua fabricação. As emissões específicas de CO₂ dependem muito do tipo de fonte de energia utilizada na geração de eletricidade de cada país. Assim, tem-se um maior ou menor potencial de mitigação de CO₂ pelos sistemas fotovoltaicos fabricados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo realizado por Tiago Filho (2006) foram levantados os processos de produção do alumínio, vidro e das células de silício, a ACV de cada um destes processos, além dos dados sobre o passivo ambiental, gastos energéticos e emissões ocorridas no processo de fabricação do módulo PV.

Para a fabricação do alumínio a conversão da bauxita (Al_2O_3), em alumínio primário é um dos processos industriais que mais consome energia no mundo, na proporção de 4 a 5 toneladas de bauxita para se produzir 2 toneladas de alumina, resultando em 1 tonelada de alumínio primário.

No módulo fotovoltaico o vidro plano temperado com baixo teor de ferro. De acordo com Fthenakis e Kim (2012), o processo passa pelas seguintes etapas: peneiramento dosagem e purificação das matérias primas básicas; secagem; mistura; fusão; têmpera e estiramento; recozimento; acabamento e corte.

Com relação a produção das células de silício, os tipos mais comuns são as formadas de silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si). O procedimento clássico de fabricação das células m-Si utiliza um método conhecido por Método Czochralski (Cz).

De acordo com Alsema e Wild-Scholten (2005) tem-se no processo os passos: mineração e refino de sílica; redução da sílica para silício; produção de Silício de alto grau de pureza; produção da célula de silício; montagem dos “Wafers” de Silício; gravação e texturização dos “wafers”; formação do emissor P-N; metalização; camada antirreflexiva; teste das células e encapsulamento.

Foi examinada a produção e deposição das baterias de chumbo-ácido e o passivo ambiental gerado durante seu processo de fabricação e deposição destas após o fim de sua vida útil. Há geração de passivos ambientais causados principalmente, pela deposição destas baterias no ambiente, pois têm um ciclo de vida muito menor do que o dos painéis fotovoltaicos, de 2 a 5 anos, durante a vida útil do painel cerca de 4 baterias serão utilizadas e descartadas. No caso do Brasil, o país quase não possui reservas minerais de chumbo. Assim para um posterior aumento de produção é necessário que o Brasil importe o chumbo primário ou secundário para garantir a produção.

Alsema e Wild-Scholten (2005) descrevem as fases: refino do chumbo; produção do óxido de chumbo (empastação); processamento do óxido de chumbo, produção das placas; produção das grades de chumbo: processamento das placas, fabricação das conexões;

fabricação da tampa e da caixa de polipropileno; fabricação dos separadores de polietileno e montagem da bateria.

Alsema et al (2006) diz que a bateria de chumbo-ácido é um componente crítico de um sistema fotovoltaico autônomo. As baterias mostram um consumo de energia entre 6,94 e 13,89 kWh /kg. A energia consumida durante o processo de manufatura da bateria que fica entre 2,5 e 4,44 kWh/kg. Por cálculo da média simples dos valores citados anteriormente, tem-se os valores médios de 10,42 kWh/kg e de 3,47 kWh/kg. A bateria fabricada totaliza um consumo de 13,89 kWh/kg.

Considerando uma bateria automotiva comum de 12 V de tensão e corrente de 45 Ah e um peso de 12 kg, os valores admitidos para cálculo o gasto energético para a fabricação de uma bateria será dado pela equação 2:

$$12K\text{ kg} \times 13,89 \frac{kWh}{kg} = 166,68kWh$$

Equação 2

O próximo passo é realizar a análise do equilíbrio energético e da mitigação do passivo ambiental gerado pela produção do módulo fotovoltaico, deste modo os aspectos ambientais relativos ao uso da energia empregada em sua fabricação devem ser considerados, já que de acordo com o tipo de energia utilizada no processo diferentes tipos de impactos ambientais podem ser gerados. Além de um custo/benefício aceitável, a energia produzida pelo módulo durante sua vida útil deve ser maior do que a adicionada ao ciclo de vida deste para a sua produção.

No caso das células de silício foram consideradas as células mono cristalinas e policristalinas, já que foram estes os tipos de células utilizadas para a produção da maioria dos módulos nas últimas décadas. Assim, nos próximos anos uma grande quantidade de módulos e de baterias estará com seu ciclo de vida finalizado e serão lançados no ambiente.

Através das Tabelas 1 a 9 obtidas de fontes na literatura de diversos autores ou elaboradas pelos próprios autores deste trabalho, são mostrados resultados para o reembolso energético e a mitigação das emissões de CO₂ do processo de fabricação de um módulo fotovoltaico padrão.

Tabela 1: Características do módulo analisado

Características do módulo PV	
Comprimento módulo (cm)	105
Largura do módulo (cm)	54,6
Área do módulo (m ²)	0,58
Perímetro do módulo (cm)	3,20
Área das células (m ²)	0,49
Número de células	32
Energia total do painel	
Potência do painel [Wp]	74,00
Horas diárias de uso	6,00
Vida Útil estimada para o painel (anos)	25,00
Produção de energia durante 1 ano (kWh)	162,06

Fonte: Autoria Própria

Tabela 2: Levantamento do gasto energético da fabricação do módulo PV

Gasto Energético (kWh)			
Material para montagem de um módulo fotovoltaico (dados por autor)	Patrícia C. Mingacho	Kim et al	Valor adotado
Vidro (5,2 kg)	—	73,55	73,55
Alumínio (2,6 kg)	—	146,04	146,04
04 Baterias de chumbo-ácido (12 kg)	666,72	—	666,72
Produção das células e do módulo	Wild-Scholten / Alsema	Kim et al	—
Silício grau metalúrgico (32 células)	—	55,00	55,00
Silício semicondutor (32 células)	432,42	—	432,42
Célula de Silício e painel fotovoltaico		—	—
TOTAL [kWh]			1373,72

Fonte: Alsema & Wild-Scholten (2006), Kim et al (2000), Mingacho (2003), modificados.

O reembolso energético calculado empregou a eq. (3) e os dados das tabelas 1 e 2, resultando na demonstração que o reembolso energético da produção do módulo fotovoltaico é dado por:

$$EPBT [\text{anos}] = E_{\text{utilizada}} / E_{\text{economizada}} = 8,48$$

Assim, o período necessário de funcionamento do painel para que ele possa amortizar seus gastos energéticos de produção é de 8,48 anos.

Restariam 16,52 anos de vida ambientalmente útil após o módulo atingir seu equilíbrio energético com relação aos gastos energéticos de sua produção.

Com estas considerações, resta ainda verificar a capacidade de mitigação do passivo ambiental e das de emissões de CO₂ gerados durante a produção do módulo. Neste estudo foram

consideradas as emissões diretas e emissões indiretas (kg de CO₂/kWh da geração da energia utilizada na produção do módulo).

Para o cálculo das emissões diretas de CO₂ foram consideradas as emissões equivalentes de CO₂ das fases de fabricação do alumínio, vidro, célula de silício e bateria de chumbo-ácido. Para obter as emissões equivalentes de CO₂ destes processos foi utilizada a tabela 3 de conversão de algumas emissões para seu equivalente em kg de CO₂.

Tabela 3: Conversão de alguns gases em kg eq - CO₂.

Tabela de equivalência de CO₂ (kg)			
Elemento	Kg CO₂-eq/kg (kg)	Elemento	Kg CO₂-eq/kg (kg)
SF ₆	24500	CFC-116	6200
SO ₂	270	Halon-1211	4900
NO ₂	270	Halon-1301	1900
CF ₄	6500	Tetracloroeto de Metila	1300
C ₂ F ₆	9200	1,1,1 - Tricloroetano	100
N ₂ O	270	HCFC - 123	90
CFC (hard)	7100	HCFC - 141b	580
CFC (soft)	1600	HCFC - 142b	1800
CFC-11	3400	HCFC - 124	440
CFC-12	7100	HCFC - 22	1600
CFC-13	13000	HFC - 125	3400
CFC-14	4500	HFC - 134	1200
CFC-113	4500	HFC - 152	150
CFC-114	7000	C	3,67
CFC-115	7000	—————	—————

Fonte: Autoria Própria

O total de emissões diretas (ED) vem da soma dos valores de emissão de CO₂ e de diversos outros gases, convertidos em seus equivalentes em CO₂, durante a produção de materiais utilizados na fabricação do módulo.

Para o cálculo de ED foi elaborada a tabela 4 montada de acordo com os valores de equivalente de CO₂ da tabela 3.

Tabela 4: Cálculo de emissão direta em equivalente de CO₂ para a produção do módulo

EMIÇÃO DIRETA EQUIVALENTE - CO₂ (kg)	
Elemento	eq -CO₂ (kg)
Total parcial (Si)	3,714
Total parcial (Al)	18,324
Total parcial (Vidro)	3,943
Total parcial (4 Baterias)	115,200
Total emissões diretas – ED (kg eq. -CO₂)	141,181

Fonte: Autoria Própria

Para os cálculos das emissões indiretas, CO₂ provenientes da geração da energia elétrica necessária para a fabricação do módulo fotovoltaico é necessário considerar o tipo de matriz energética utilizada para a geração desta energia.

Para isto deve ser considerada a quantidade de CO₂ emitido para cada kWh de energia produzida em cada país analisado. Para isto é utilizado o chamado Fator de Emissão de CO₂ - (FE), este nada mais é do que a quantidade de CO₂ emitida por kWh de energia gerada, de acordo com a matriz energética de cada país, mostrado na tabela 5.

Tabela 5: Composição dos fatores de emissão equivalentes em kg de CO₂/kWh para a matriz energética de diferentes países

País	Fator de Emissão de CO ₂ da produção de eletricidade (kg - CO ₂ /kWh)
BrasilSINT	0,054(1)
Japão	0,439(2)
Alemanha	0,530(2)
EUA	0,703(3)
BrasilSISO	0,821(4)

Fonte: Elaboração Própria a partir das seguintes fontes: Tiago Filho et al (2006).

Segundo o Departamento de Desenvolvimento Energético (DDE) do Ministério de Minas e Energia – MME (2016), não estão disponíveis oficialmente um valor único relativo ao fator de emissão no Brasil (FE), embora exista um estudo em andamento. A dificuldade em se obter o FE refere-se ao próprio Sistema Interligado - SIN que possui características diferenciadas dos sistemas elétricos de outros países onde se conhece o cálculo de emissões. Um trabalho com dados de 2003 realizado pelo DDE/MME em conjunto com a Universidade de Salvador – UNIFACS, revelou um valor médio do FE de 0,054 ton CO₂ / MWh.

Se para o Sistema Isolado, forem adotados valores de emissão de CO₂ emitidos por um termoeletrico padrão de 15 MW, é possível calcular os valores da quantidade de CO₂ emitido pela energia consumida na fabricação do módulo e a quantidade de CO₂ evitada com o funcionamento do módulo durante sua vida útil em cada país analisado.

Para estes cálculos foi utilizada a seguinte metodologia:

1) Cálculo das emissões indiretas de CO₂ (EI) dado pela equação. (4):

$$EI = FE \times GEM \quad (2)$$

Onde:

- EI (Emissão Indireta) - emissão em kg equivalente de CO₂ relativo ao consumo total de energia da produção do módulo.
- FE (Fator de Emissão adotado para o país) - emissão de kg equivalente de CO₂/kWh de energia gerada em cada país analisado;

- GEM (Gasto de Energia do Módulo) – consumo total de energia para produção do módulo.

2) Cálculo das Emissões Diretas de CO₂ (ED): De acordo com o valor obtido pela tabela 4 tem-se ED= 141,181 kg eq. -CO₂.

3) Cálculo do total de emissões de CO₂ da produção do módulo (ET) dado pela equação.

(5):

$$ET = ED + EI \quad (3)$$

Onde:

- ET = total de emissões de CO₂ da fabricação do módulo PV
- ED = Emissões diretas da fabricação do módulo PV
- EI = Emissões indiretas da fabricação do módulo PV

Utilizando os resultados obtidos monta-se a tabela 6.

Tabela 6: Total equivalentes de emissões de kg CO₂/kWh da fabricação do módulo PV para diferentes países.

Emissão Total de GEE (kg eq -CO ₂ / kWh)				
País de origem	FE ⁽¹⁾ (kg - CO ₂ / kWh)	GEM ⁽²⁾ (kWh/ módulo)	E _I = FE x GEM ⁽³⁾ (kg eq - CO ₂ / módulo)	E _T = E _D + E _I ⁽⁴⁾ (E _D = 141,181)
Brasil _{SINT}	0.054	1373,72	74,181	215,362
Japão	0.439		603,061	744,242
Alemanha	0.530		728,069	869,250
EUA	0.703		965,722	1106,903
Brasil _{ISO}	0.821		1127,821	1269,002

(1) Fator de emissão; (2)gasto de energia por módulo; (3)Emissões indiretas; (4) total de emissões

Fonte: Autoria Própria

4) Cálculo das emissões de CO₂ evitadas durante um ano de vida útil do módulo (EE):

De acordo com a tab. 1 a quantidade de energia gerada pelo painel durante um ano é de 162,06 kWh. Com isso tem-se a equação (5).

$$EE = 162,06 \times FE \quad (5)$$

Onde:

- EE - emissões evitadas com a utilização do módulo PV durante um ano de funcionamento no país de destino
- 162,06 – Energia produzida pelo módulo PV ao longo de um ano de funcionamento.
- FE = fator de emissão do país de destino analisado.

Com os resultados dos cálculos da Eq. 5 foi elaborada a tabela 7

Tabela 7: Emissões de CO₂ Evitadas pelo módulo PV durante um ano de seu ciclo de vida – EE

País	Emissões CO₂ evitadas pelo módulo durante 1 ano (kg-CO₂)
Brasil_{SINT}	8,751
Japão	71,144
Alemanha	85,892
EUA	113,928
Brasil_{SISO}	133,051

Fonte: Autoria Própria

O equilíbrio de emissões de CO₂ é calculado tomando-se a quantidade de CO₂ gerada na produção do módulo e subtraindo este valor da quantidade de emissões de CO₂ evitadas com a utilização do módulo durante de sua vida útil. Obtêm-se o saldo de emissões de CO₂ da fabricação do módulo PV.

Em caso de resultado com valor positivo mostra que o módulo é capaz de mitigar o CO₂ gerado por sua produção, também faz com que a matriz energética local não emita um valor equivalente em CO₂, pela geração de energia elétrica originada de fontes fósseis. Sendo valor negativo mostra que o módulo não é capaz de mitigar o CO₂ emitido durante a sua produção. Seria necessário um tempo de funcionamento maior que seu ciclo de vida para equilíbrio das emissões de CO₂ de todo o processo.

Em síntese, para saber quanto o módulo precisa funcionar para mitigar as emissões de CO₂ é preciso dividir a quantidade total de emissões durante a produção (considerando o local de produção do módulo) pela quantidade de emissão de CO₂ evitada durante um ano de funcionamento do painel (considerando o local de operação do módulo).

Conhecido o tempo necessário para que o módulo possa mitigar as emissões de CO₂, é obtido o tempo necessário para que o módulo possa cobrir tanto os gastos energéticos quanto os de mitigação de CO₂, de acordo com o país onde for fabricado e/ou instalado.

No decorrer do funcionamento do painel, tem-se simultaneamente mitigação de CO₂ e amortização da energia gasta em sua fabricação.

Depois de calcular o tempo necessário para que o módulo possa mitigar as emissões de GEE é possível avaliar o tempo necessário para que o módulo possa cobrir tanto os gastos energéticos quanto os de mitigação da emissão dos GEE, de acordo com o país onde for fabricado e/ou instalado. Este cálculo é feito considerando-se a simultaneidade da ocorrência destes fatores prevalecendo o maior valor entre ambos.

Observa-se que um tempo de vida ambientalmente útil com valor negativo significa que o painel não consegue equilibrar seu gasto energético e de mitigação de CO₂ durante sua vida útil e necessita funcionar por mais alguns anos para conseguir equilíbrio.

Como nestas análises não se contempla um estudo de impactos ambientais detalhado, será adotado um tempo estimado de 2,5 anos do tempo de vida útil do módulo para custear os passivos ambientais gerados pela produção do módulo PV.

Subtraindo-se este valor dos resultados obtidos nos cálculos dos itens descritos acima, tem-se a tabela 8.

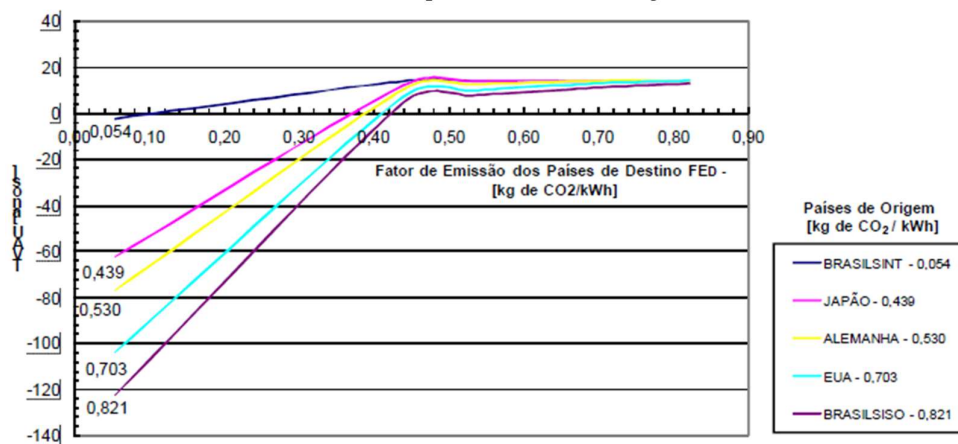
Tabela 8: Tempo de vida ambientalmente útil (TVAU) do módulo PV após amortizações (emissões de CO₂, energia de fabricação e passivo ambiental)

País ou local de destino do módulo PV	FE ⁽¹⁾	País ou local de origem do módulo PV				
		Brasil _{sint}	Japão	Alemanha	EUA	Brasil _{siso}
Brasil _{sint}	0,054	-2,11	-62,54	-76,83	-103,99	-122,51
Japão	0,439	14,02	12,04	10,28	6,94	4,66
Alemanha	0,530	14,02	13,84	12,38	9,61	7,73
EUA	0,703	14,02	14,02	14,02	12,78	11,36
Brasil _{siso}	0,821	14,02	14,02	14,02	14,02	12,96

Fonte: Autoria Própria

De acordo com os dados da tabela 8 foi elaborado o gráfico da figura 21.

Figura 21: Tempo de Vida Ambientalmente Útil - TVAU, do módulo PV padrão, com 1m² de área considerando os Fatores de Emissão, FE, dos GEE dos países ou locais de origem - FEO, e dos destinos - FED



Fonte: Autoria Própria

O gráfico da figura 21 mostra que o tempo no qual o módulo PV é capaz de gerar energia limpa. Demonstra que seu tempo de vida ambientalmente útil tende a diminuir quanto maior o fator de emissão (FE) do país de origem e menor o FE do país de destino.

Os valores negativos de tempo significam que o módulo deve permanecer em funcionamento por um tempo maior do que os 25 anos para ocorrer a amortização. Neste caso, se o módulo for fabricado em um país com uma matriz energética totalmente limpa, ou seja, isenta de emissões de CO₂ ainda resta ao painel amortizar os custos das emissões diretas de CO₂.

Cada país de destino deverá arcar com os custos de amortização de 2,5 anos para o passivo ambiental, 8,48 anos para amortizar a energia utilizada para a fabricação do módulo (EPBT) e um valor em anos necessário para amortizar os 141,181 kg de CO₂ de emissões diretas ocasionadas pela fabricação do módulo PV.

Com os dados obtidos até o momento pode-se então formar um gráfico capaz de fornecer, de acordo com o valor de E₀/E_D, o tempo em que o módulo PV produzirá energia realmente “limpa”.

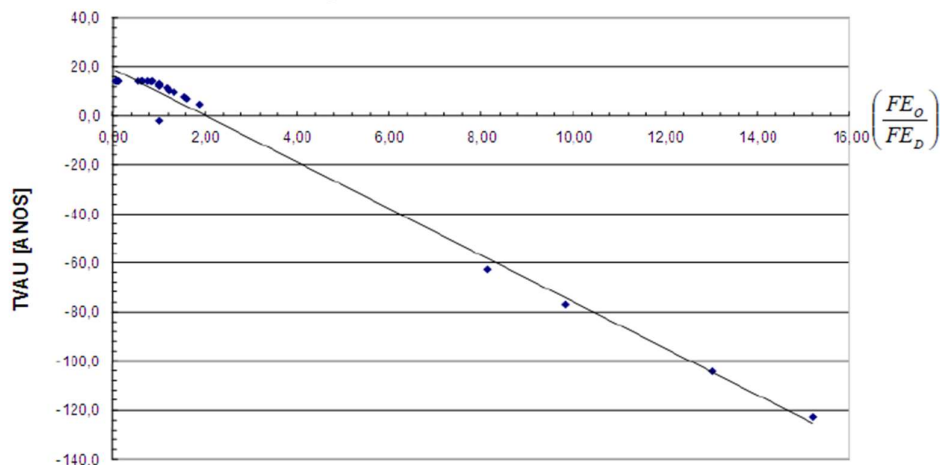
Tabela 9: Valores de Tempo de Vida Ambientalmente Útil- TVAU para o módulo PV Padrão para a relação FEO/FED

País de destino	Relação	País de Origem				
		Brasil _{sint}	Japão	Alemanha	EUA	Brasil _{siso}
Brasil _{sint}	FE ₀ /FE _D	1	8,13	9,81	13,02	15,20
	TVAU anos	-2,11	-62,54	-76,83	-103,98	-122,51
Japão	FE ₀ /FE _D	0,12	1	1,21	1,60	1,87
	TVAU anos	14,02	12,04	10,28	6,94	4,66
Alemanha	FE ₀ /FE _D	0,10	0,83	1	1,33	1,55
	TVAU anos	14,02	13,83	12,38	9,61	7,73
EUA	FE ₀ /FE _D	0,08	0,624	0,75	1	1,17
	TVAU anos	14,02	14,02	14,02	12,78	11,36
Brasil _{siso}	FE ₀ /FE _D	0,07	0,53	0,65	0,86	1
	TVAU anos	14,02	14,02	14,02	14,02	12,96

Fonte: Autoria Própria

Deste modo tem-se a Tabela 9 e o gráfico da Figura 22.

Figura 22: Tempo de vida ambientalmente útil versus relação dos fatores de emissão de GEE entre os países de origem e de destino – FEO /FED.



Fonte: Autoria Própria

A equação de tendência da curva da fig. 3 é dada pela equação (6):

$$T_{VAU} = -9,497 \cdot \left(\frac{FE_o}{FE_D} \right) + 19,415$$

Onde:

TVAU – Tempo e vida ambientalmente úteis do módulo PV

FE0/FED – relação entre os fatores de emissão de CO2 dos países de Origem (E0) e de destino (ED) do módulo PV.

Analisando a curva da figura 22 verifica-se que quanto menor a relação entre E0 e ED maior o tempo de vida ambientalmente útil do módulo.

Quando o valor de E0/ED for igual à zero, pode-se obter o maior valor de tempo de vida ambientalmente útil alcançado pelo módulo depois de amortizados os seus custos ambientais e energéticos. Neste caso o valor obtido é 19,41 anos.

Na reta estabelecida pelo gráfico da figura 22, caso os valores de E0/ED sejam maiores do que os valores mínimos para que se obtenha algum valor positivo (E0/ED = 2,0), o módulo não consegue amortizar os gastos e termina seu ciclo de vida com um prejuízo ambiental.

Conhecendo-se o FE da matriz energética do país de origem e do país de destino do módulo PV, é possível verificar se é ambientalmente viável ou não a fabricação e operação desejada para o projeto de módulos PV analisado.

As análises realizadas mostram que existe uma relação entre o fator de emissão de CO2 dos países de origem e de destino considerados e o tempo de vida ambientalmente útil do módulo.

Quanto menor o FE do país de origem do módulo PV e maior o FE do país de destino maior será o tempo de vida ambientalmente útil do módulo. A relação inversa também ocorre, podendo até ocorrer a inexistência de vida ambientalmente útil o que torna a operação do módulo ambientalmente inviável.

Presumindo para o Protocolo de Quioto nos projetos de Mecanismos de Produção Limpa (MDL) do Protocolo de Quioto não é esperado que projetos de sistemas fotovoltaicos possam se tornar elegíveis para aceitação. A utilização de módulos PV produzidos em determinados países não é capaz de mitigar a contento as emissões de CO2 quando utilizados em países com menor fator de emissão.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho fica demonstrado que até alcançar o consumidor final, a produção do módulo fotovoltaico produz uma série de passivos ambientais que devem ser considerados, especialmente com relação à emissão de CO₂.

Entre as recomendações é preciso considerar que na obtenção de novos sistemas fotovoltaicos, seja verificada a matriz energética utilizada no país de origem e/ou de destino para que se evite prejuízos ambientais em ambos os casos, num panorama de influência global.

Ao custo de mitigação do passivo ambiental gerado pela fabricação do módulo e o tipo de matriz energética é relevante no processo de amortização dos custos ambientais.

Na aquisição de sistemas PV importados de países que possuam uma matriz energética com um FE maior do que a do Brasil, resultará em prejuízo ambiental tanto maior quanto maiores forem os FE do país de origem dos módulos.

A logística reversa é de importância inquestionável, a segurança do suprimento advindo da recuperação e reciclagem impulsionará o mercado de matérias-primas secundárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR, 2023. **Panorama do solar fotovoltaico no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05/04/24.

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: 05/04/24.

ALSEMA, E.A.; E.W WILD-SCHOLTEN, MARISKA J. DE ;. TER HORST, M. BÄCHLER, V.M. FTHENAKIS, A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems, **21th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Dresden, Germany, 4-8 September 2006 – disponível em: <http://www.photovoltaicconference.com/> acesso em 01Mai2024.

ALSEMA. E.A; WILD-SCHOLTEN, J. Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production, Proceedings of the Materials Research Society Fall 2005. **Meeting, Symposium G**, Boston, USA, 2005, / material disponível on line em: www.mrs.org – acesso em 01Mai2024.

ALSEMA, ERIK A.; NIEUWLAAR, EVERT. Energy Pay-Back Time (EPBT) and CO2 Mitigation Potential , apresentado a **IEA PVPS 1 workshop**. Aspectos ambientais de sistemas de força PV, Netherlands, 1997

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: 03/05/24.

BRASIL. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

BRITTO, M. P., DEKKER, R. Reverse Logistics – a framework. **Econometric Institute Report**, 2002.

CAMPOS, Tatiana de. **Logística Reversa: Aplicação ao problema das embalagens da CEAGESP**. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

EIA. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2016**. 2016. Disponível em: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/electricity.cfm>>. Acesso em: 03 mai. 2024.

FELIZARDO, Jean Mari. **Logística reversa: competitividade com desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Papel Virtual, 2005.

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: 03/05/24.

FTHENAKIS, V. M. E. L. P. A. **Electricity from sunlight: photovoltaic systems integration and sustainability** - Second Edition. [S.l.]: Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2018.

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: 03/05/2024.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 2. ed. São Paulo: 1989.

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?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em: 05/04/24.

IRENA and IEA-PVPS. **International Renewable Energy Agency and International Agency Photovoltaic Power Systems. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016.

JARDIM, Carolina da Silva. **A Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Alimentadores Urbanos Enfocando a Redução do Pico de Demanda Diurno**. 2007. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

LACERDA, Leonardo. Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. **Sargars Competência Logística**. Disponível em: http://www.sargars.com.br/site/artigos_pdf/artigo_logistica_reversa_leonardo_lacerda.pdf> Acesso em: 03 de maio de 2024.

Mingacho, Patrícia Catarina, (2003). **Tipologia dos Impactes Ambientais Associados às Fontes de Energias renováveis**. Lisboa, 2003. 210p. , relatório de Trabalho Final de Curso para Licenciatura em Engenharia do ambiente – Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.

MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – **Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – **Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

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

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: 05/04/24.

OMETTO, ALDO ROBERTO. **Avaliação do Ciclo de Vida e a Gestão Pós Consumo de Produtos Eletroeletrônicos.** / Apresentado no 20 Mini-Curso do VI Workshop de Adequação Ambiental em Manufatura. 2005.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil:** Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

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

SANTOS, Ísis Portolan dos. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista.** 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SCHMIDT, Jannick H. Documentation of the contribution analysis and uncertainty assessment: Results interpretation identifying priority material flows and wastes for waste prevention, recycling and choice of waste treatment options. Policy recommendations. In: **FRAMEWORK PROGRAMME PRIORITY**, 6. Denmark, 2009. p. 1 - 58.

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: 03/05/24.

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: 03/05/2024.

TIAGO FILHO, GERALDO LÚCIO ET AL., **Avaliação do Potencial de aplicação do MDL em Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos no estado de Minas Gerais.** 15p. / apresentado no **6º Simpósio Brasileiro Sobre pequenas e Médias centrais Hidroelétricas.** Florianópolis. 2006.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

UE- União Europeia - **DIRETIVA 2012/19/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO** de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) . Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>; acesso em 20 set 2024.