

# Trabalho de Conclusão de Curso

## SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ESTUDO SOBRE RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA PARA O BRASIL

Joana Pauli Ghizoni



Universidade Federal de Santa Catarina  
Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental



Joana Pauli Ghizoni

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ESTUDO SOBRE  
RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA PARA O BRASIL**

Trabalho submetido a Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ghizoni, Joana Pauli

Sistemas Fotovoltaicos: Estudo sobre Reciclagem e  
Logística Reversa para o Brasil / Joana Pauli Ghizoni ;  
orientador, Armando Borges de Castilhos Junior -  
Florianópolis, SC, 2016.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Módulos  
fotovoltaicos. 3. Reciclagem. 4. Logística Reversa. 5.  
Resíduos fotovoltaicos. I. Borges de Castilhos Junior,  
Armando. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Joana Pauli Ghizoni

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ESTUDO SOBRE  
RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA PARA O BRASIL**

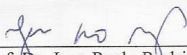
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Sanitarista e Ambiental e aprovado pela banca examinadora.

Florianópolis, 02 de dezembro de 2016.


**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior  
Orientador



Prof. Dr. Jean Paulo Rodrigues  
Membro da Banca



Eng.ª Ms. Renata Martins Pacheco  
Membro da Banca



Dedico este trabalho aos meus queridos pais, que sempre apoiaram e incentivaram o meu estudo.





## AGRADECIMENTOS

Agradeço eterna e profundamente aos meus pais, João e Myrthis, por sempre acreditarem em mim e não medirem esforços para me ver feliz e me darem todas as oportunidades em busca dos meus sonhos. Sou extremamente grata por todo apoio incondicional em relação aos estudos e à leitura, desde a infância. Espero um dia ser pelo menos metade do que eles são e seguir de exemplo para meus filhos, como eles foram e continuam sendo para mim.

Agradeço ao meu irmão Pedro, que apesar das nossas divergências, sei que torce muito por mim. Tenho absoluta certeza que estaremos sempre um ao lado do outro.

Agradeço ao meu namorado Mathias, por todos os momentos compartilhados ao longo desses anos de namoro e por toda paciência durante a execução deste trabalho. Por ser tão prestativo comigo e por ter contribuído de maneira muito positiva para o desenvolvimento do presente estudo.

Agradeço as minhas eternas amigas da faculdade, Carolina Flores, Clara Sprícigo, Cristina Brummer e Mariane Scheffer pela sintonia e amizade desde o primeiro semestre de aula. Obrigada pela oportunidade de ter convivido com vocês e de ter vocês para o resto da minha vida.

Agradeço a minha turma 2010.2, por todo companheirismo ao longo dessa jornada. Por sempre estarem dispostos a ajudar um ao outro. As experiências compartilhadas foram a melhor parte da minha formação acadêmica. Nos provamos que a amizade verdadeira é uma grande conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior, por ter acreditado na minha capacidade e na abordagem do tema, algo tão novo e com tão pouco estudo desenvolvido.

Agradeço aos membros da banca Prof. Dr. Jean Paulo Rodrigues e Renata Martins Pacheco, por terem se disposto a conhecer e avaliar o meu trabalho.

Por fim, agradeço ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os professores dos quais tive a honra de ter sido aluna, que contribuíram com a construção da profissional que irei me tornar.

Muito obrigada.



Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o  
que ensina.

(Cora Carolina)



## RESUMO

Um dos grandes marcos da utilização de energia pelo homem aconteceu no século XVIII, com a invenção da máquina a vapor, quando teve início a Revolução Industrial na Europa. Todo o desenvolvimento tecnológico e industrial alcançado, desde então, teve como suporte a energia oriunda, sobretudo, de base fóssil, ou seja, combustíveis passíveis de esgotamento, por serem utilizados com velocidade bem maior que o período necessário para sua acumulação. Além disso, também são esses combustíveis os responsáveis por causarem impactos ambientais, seja através da contaminação do ar, da chuva ácida ou do aquecimento global, decorrente em parte das emissões gasosas. Diante deste cenário, a busca por fontes alternativas de geração de energia tem se intensificado no último século, destacando-se, talvez, como a mais promissora, a energia fotovoltaica. Além de ser uma fonte inesgotável, a produção de energia por meio de módulos fotovoltaicos se diferencia por ser silenciosa, não poluente e com possibilidade de gerar energia de forma distribuída. A conversão em energia elétrica a partir da incidência da luz solar só é possível por meio do uso dos módulos fotovoltaicos. Entretanto, estes módulos possuem uma vida útil limitada e, dessa forma, em um futuro próximo, grandes quantidades desse material serão descartados. Isto posto, e para evitar que uma solução energética vire um problema ambiental, torna-se essencial que sejam adotadas medidas de tratamento para a reciclagem para estes resíduos, com as finalidades de recuperar matérias-primas importantes, reduzir os custos de produção e os impactos que os componentes desses módulos podem trazer para o meio ambiente e saúde humana, se descartados de maneira inadequada. Por meio de levantamentos bibliográficos a respeito do tema, este trabalho procurou contribuir com a discussão para estimular medidas de prevenção de impactos ambientais inerentes ao uso dessa tecnologia no Brasil. Foram apontadas sugestões de tratamentos para a reciclagem que possam ser empregadas, relacionadas às tecnologias fotovoltaicas que terão maiores geração de resíduos no futuro. Ademais, propôs-se um sistema de logística reversa para os resíduos fotovoltaicos, mostrando a possibilidade de inserir um sistema que esteja apto a recircular o material na cadeia produtiva, gerando valor agregado ao produto e desenvolvimento econômico. Por fim, tendo como referência a legislação vigente na União Europeia, recomendou-se algumas medidas pertinentes que poderiam ser implementadas em uma legislação para o Brasil.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica. Módulos fotovoltaicos. Resíduos fotovoltaicos. Fim de vida útil. Reciclagem. Logística reversa. Legislação.

## ABSTRACT

One of the great milestones of the use of energy by man took place in the eighteenth century, with the invention of the steam engine, when the Industrial Revolution began in Europe. Since then, all technological and industrial development has been supported by fossil-based energy, that is, fuels that can be exhausted because they are used at a much faster rate than the time required for their accumulation. In addition, these fuels are also responsible for causing environmental impacts, whether through air pollution, acid rain or climate change. Given this scenario, the search for alternative sources of energy has intensified in the last century, and, perhaps, photovoltaic energy can be highlighted as the most promising. In addition to being an inexhaustible source, photovoltaic solar energy production stands-out for being silent, non-polluting and with the possibility of generating energy in a distributed way. The conversion into electrical energy from the incidence of sunlight is only possible through the use of photovoltaic modules. These modules have a limited life span and thus, in the near future, large quantities of this material will be discarded. In order to prevent an energy solution from becoming an environmental problem, it is essential to adopt treatment and recycling measures for this waste, with the aim of recovering important materials, reducing production costs and also the impacts that the components of these modules can bring to the environment and human health. Through bibliographical review on the subject, this work meant to contribute to the discussion to stimulate prevention measures regarding the problem in Brazil. Suggestions for the recycling and treatment of this material were made, considering that photovoltaic technologies will have larger generation of waste in the future. In addition, a reverse logistic system for photovoltaic waste was proposed, showing the possibility of inserting a system that is able to recirculate the material in the production chain, generating added value to the product and economic development. Finally, considering the legislation in force in the European Union, some relevant measures that could be implemented in legislation for Brazil were recommended.

**Keywords:** Solar photovoltaic energy. Photovoltaic modules. Photovoltaic waste. End-of-life. Recycling. Reverse Logistic. Legislation.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta de energia por fonte no mundo. ....	34
Figura 2: Produção de energia por fonte. ....	35
Figura 3: Previsão de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis do mundo até 2040, em TWh.....	36
Figura 4: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no ano de 2015. ....	37
Figura 5: Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B) e um conjunto de módulos fotovoltaicos (C). ....	39
Figura 6: Representação dos módulos de 1ª geração. ....	41
Figura 7: Representação de um módulo de 2ª geração.....	42
Figura 8: Representação de um módulo de 3ª geração.....	43
Figura 9: Principais materiais usados na fabricação de módulos fotovoltaicos. ....	44
Figura 10: Evolução da capacidade instalada acumulada no mundo, em megawatts (MW). ....	46
Figura 11: Distribuição das tecnologias fotovoltaicas em 2020.....	47
Figura 12: Projeção de resíduos gerados provenientes dos módulos fotovoltaicos (em toneladas).....	47
Figura 13: Sistema de logística reversa.....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações dos módulos fotovoltaicos de 1ª e 2ª geração. .....	43
Tabela 2: Composição dos módulos fotovoltaicos de 1ª e 2ª geração... 44	44
Tabela 3: Metas anuais da Diretiva REEE. ....	53
Tabela 4: Opções de destinação dos componentes.....	60
Tabela 5: Processos envolvidos em cada fase dos métodos citados.....	63



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a-Si	Silício amorfo
BEN	Balanco Energético Nacional
Cd	Cádmio
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CPV	<i>Concentrator Photovoltaics</i>
c-Si	Silício cristalino
DSSC	<i>Dry-sensitised solar cells</i>
EEE	Equipamento Eletroeletrônico
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
FF	Filmes finos
FV	Fotovoltaico
Ga	Gálio
GaAs	Arseneto de gálio
GW	Gigawatt
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
In	Índio
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
m-Si	Silício monocristalino
MW	Megawatt
NO <sub>x</sub>	Óxido de nitrogênio
p-Si	Silício policristalino
REEE	Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico
RLEC	<i>Reverse Logistics Executive Council</i>
Se	Selênio
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
Te	Telúrio
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
TWh	Tera-watt hora
UV	Ultravioleta
V	Volt
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>
Wp	Watt-pico



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>29</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>31</b>
3.1. OBJETIVO GERAL .....	31
3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	31
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>33</b>
4.1. CONTEXTO ENERGÉTICO .....	33
4.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	38
4.3. A IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM NO SETOR FOTOVOLTAICO .....	45
4.4. LOGÍSTICA REVERSA .....	49
4.5. POLÍTICAS ADOTADAS PELA UNIÃO EUROPEIA .....	52
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>57</b>
6.1. FATORES CONDICIONANTES QUE VIABILIZAM A INSERÇÃO DE EMPRESAS DE RECICLAGEM FOTOVOLTAICA .....	57
6.2. ANÁLISE PROPOSITIVA DE TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA O BRASIL .....	58
6.3. LOGÍSTICA REVERSA APLICADA AOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	63
6.4. PROPOSIÇÃO DE LEGISLAÇÃO PARA RESÍDUOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	66
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>





## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade ambiental é um dos temas mais debatidos na atualidade. Fóruns mundiais discutem frequentemente a utilização dos recursos naturais e sua preservação para gerações futuras. Tais debates ressaltam também a preocupação com o modo de produção de energia, que é um elemento significativo de degradação ambiental, e, ao mesmo tempo, a base da evolução tecnológica humana (SANTOS, 2009).

O mundo utiliza majoritariamente no seu suprimento fontes energéticas primárias não renováveis, em particular, os combustíveis fósseis, representando, segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2016 (ano base 2015), 31,1% de petróleo, 28,9% de carvão mineral e 21,4% de gás natural. O uso desses combustíveis emitem grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, um dos gases relacionados com o efeito estufa, causador da elevação da temperatura do planeta e de mudanças climáticas. Devido aos atuais fenômenos de mudanças climáticas e das catástrofes relacionadas a isso, a preocupação com os impactos ambientais vem crescendo com a consciência de que a vida na Terra depende dos recursos naturais para se manter em equilíbrio.

Ao mesmo tempo em que o homem precisa de energia elétrica para seu desenvolvimento, ele precisa encontrar formas para que essa geração não degrade o meio ambiente, buscando alternativas para minimizar os impactos e garantir o fornecimento adequado de energia a toda população. Diante desta realidade, do fortalecimento dos movimentos em defesa do meio ambiente e do desenvolvimento sustentável, aliados à necessidade da redução do impacto ambiental, a tecnologia dos sistemas solares fotovoltaicos surge como uma excelente alternativa para a produção de energia elétrica, propondo através do uso de uma tecnologia diferenciada, a minimização dos impactos à natureza e diversos benefícios socioambientais para o mundo.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do novo milênio. Segundo o estudo do Plano Nacional de Energia 2030, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a irradiação solar incidente por ano na superfície da Terra é suficiente para atender 10.000 vezes o consumo anual de energia do mundo.

Energia solar é a designação dada a qualquer tipo de captação de energia luminosa proveniente do Sol, e posterior transformação dessa

energia captada em alguma forma utilizável pelo homem, seja diretamente para aquecimento de água ou para produção de energia elétrica ou mecânica, utilizando módulos fotovoltaicos. Os módulos solares fotovoltaicos são dispositivos semicondutores que por meio de uma diferença de potencial elétrico, gerada por ação da luz, absorvem a energia e fazem a corrente elétrica fluir entre duas camadas com cargas opostas, gerando uma corrente elétrica.

Em virtude da tecnologia fotovoltaica representar uma fonte silenciosa, não poluente e renovável de energia elétrica, com a possibilidade de geração de energia de forma distribuída - diferente das fontes de base fóssil -, o emprego desse sistema de energia tem se mostrado viável e encontra-se em crescente expansão no Brasil e no mundo.

Diante deste cenário, a medida em que a procura pela tecnologia fotovoltaica aumenta, há o aumento do mercado produtor de módulos fotovoltaicos e o conseqüente aumento do volume de resíduos gerados pelo fim de vida útil dos mesmos. Dada uma média de vida útil entre 25 e 30 anos para os módulos, estima-se grandes acumulações de resíduos gerados por eles a partir de 2030. A Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA – Internacional Renewable Energy Agency) mostrou uma projeção estimada em 1,7 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos para o ano de 2030, e 60 milhões de toneladas para o ano de 2050 (IRENA, 2016). Este avanço do mercado fotovoltaico e a inserção deste novo tipo de resíduo na sociedade, representa um novo desafio ambiental, que necessita de legislação adequada e uma ação política proativa.

Ao chegar ao fim de sua vida útil, os módulos fotovoltaicos são classificados pela Diretiva da Comunidade Europeia como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, também conhecido como REEE, - ou WEEE, do inglês *Waste Electrical and Electronic Equipment*. Porém, essa classificação é válida apenas para o continente europeu, enquanto nos demais lugares onde esta tecnologia é utilizada, estes resíduos estão inseridos, ainda, na classificação de rejeitos geral.

O crescimento exorbitante de resíduos, poderá provocar impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde humana se não forem descartados corretamente e não tiverem um sistema de tratamento adequado. Tais impactos são associados à lixiviação de metais pesados, à perda de recursos convencionais (principalmente vidro e alumínio) e à perda de metais raros (prata, índio, gálio e germânio), problemas típicos de REEE (VÉRONIQUE MONIER, 2011).

A grande diversidade de materiais presente nos REEE torna difícil generalizar a sua composição. Entretanto, costuma-se dividir os materiais presentes nos REEE em cinco categorias: metais ferrosos, metais não-ferrosos, vidro, polímero e outros (WILDMER et al., 2005).

Geralmente, os módulos fotovoltaicos são constituídos de vidro, alumínio, algum material semicondutor (que varia de acordo com a tecnologia fotovoltaica aplicada) e alguns metais para condução elétrica, como cobre e prata. Além disso, há também a presença de polímeros, com a finalidade de unir os componentes e exercer a função de proteção. É sabido que diversos destes materiais possuem valor econômico de interesse e que, se recuperados, podem ser reciclados com facilidade (BROUWER; GUPTA; HONDA, 2011).

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos aparece como uma das alternativas para minimizar a questão do acúmulo de resíduos gerados, transformando os materiais obsoletos em novas fontes de matéria prima. Uma vez recuperado, o material volta a circular na economia, servindo para a produção de novos produtos ou sendo vendido em outros mercados de interesse. A reciclagem dos módulos fotovoltaicos poderá ser fundamental na transição do mundo para um futuro de energia sustentável, economicamente viável e cada vez mais a base de energias renováveis.

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à introdução, o segundo apresenta a justificativa do tema escolhido. No terceiro capítulo são expostos o objetivo geral e os objetivos específicos que esse trabalho pretende alcançar. O quarto capítulo contém uma fundamentação teórica que abrange o atual contexto energético global e brasileiro, uma interpretação referente à energia solar fotovoltaica, uma análise a respeito dos módulos solares fotovoltaicos, a importância do tratamento de reciclagem no setor fotovoltaico, um breve contexto sobre logística reversa e, por fim, as políticas legislativas adotadas no âmbito da União Europeia. No quinto capítulo apresenta-se o procedimento metodológico utilizado durante o desenvolvimento deste trabalho. No sexto capítulo são expostos os resultados alcançados. O último capítulo aborda as conclusões, contendo recomendações necessárias e encaminhamentos do trabalho.



## 2. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que o sistema energético mundial está baseado em sua grande maioria em fontes não-renováveis e impactantes ao ambiente, merecem destaques as iniciativas que promovam o avanço de fontes renováveis buscando o mínimo impacto ambiental. A energia fotovoltaica se caracteriza como uma alternativa aos sistemas energéticos convencionais e poluentes por ser um modo de geração de energia limpa, renovável e que possibilita a produção de energia elétrica de forma distribuída, ou seja, podendo ser implantada de forma descentralizada e próximo aos consumidores. Essa última, para o Brasil, um país com tamanha extensão territorial, é imprescindível. Atualmente, nossas redes de transmissão e distribuição precisam atender distâncias quilométricas, o que implica em altos custos com sua implantação e manutenção, sobrecarga do sistema e grandes perdas de eficiência.

Nos últimos anos, as instalações fotovoltaicas têm crescido de forma exorbitante, gerando uma problematização até então desconhecida nos dias atuais: a destinação que se deve adotar com a chegada de enormes quantidades de resíduos que serão gerados num futuro próximo com o fim de vida útil dos módulos fotovoltaicos.

Este trabalho se fundamenta na necessidade de buscar sistemas de reciclagens viáveis para os módulos fotovoltaicos no Brasil, objetivando a inserção destes resíduos na cadeia produtiva como matéria prima reciclada, e com isso reduzindo os impactos que possam causar ao meio ambiente se descartados de maneira inapropriada.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente trabalho é propor alternativas de destinação final para os resíduos de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil.

#### **3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Fazer um levantamento sobre as tecnologias de reciclagem disponíveis para os módulos fotovoltaicos, visando aplicabilidade no Brasil;
- Apresentar um possível processo de logística reversa aos módulos fotovoltaicos;
- Sugerir proposta de legislação adequada, a ser adotada pelo Brasil, que garanta a destinação final ambientalmente adequados módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil, visando reduzir e os impactos ambientais.





## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. CONTEXTO ENERGÉTICO

A vida do homem tem uma elevada dependência de energia e os governos dos países têm como uma de suas principais preocupações o adequado fornecimento de energia para o desenvolvimento da sua nação. A disponibilidade energética fica dependente, dentre outros fatores, da matriz energética utilizada e da capacidade de distribuição, os quais devem estar em sintonia com a demanda energética dos consumidores (SANTOS, 2009).

As energias não renováveis, segundo Reis *et al.* (2005), são aquelas passíveis de esgotamento por serem utilizadas com velocidade bem maior que o período necessário para sua acumulação. Entre essas se encontram os derivados de petróleo, o carvão, o gás natural, entre outras. Além das características de não renováveis, essas fontes de energia também são as responsáveis pela degradação ambiental causada pelas suas extrações e também pelos problemas ambientais gerados em sua utilização.

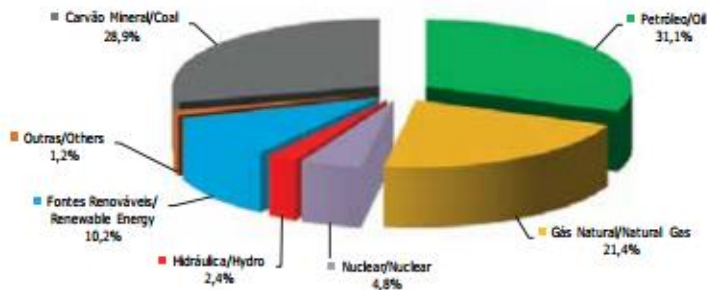
As energias renováveis são aquelas cujas fontes não se esgotam, ou seja, se renovam. Elas também são consideradas como “energias alternativas” ao modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade (presente e futura) garantida (diferente dos combustíveis fósseis que precisam de milhares de anos para a sua formação), como pelo seu menor impacto ambiental (JARDIM, 2007). Entre elas, destacam-se a energia hidrelétrica, solar, eólica, biomassa, oceânica, geotérmica, entre outras.

Globalmente, segundo dados publicados pelo BEN – Balanço Energético Nacional 2016 (ano base 2015), os combustíveis fósseis continuam sendo a base da oferta de energia primária dos países. Na Figura 1 observa-se que a oferta mundial de energia por fonte em 2013 foi composta por 31,1% de petróleo, 28,9% de carvão mineral, 21,4% de gás natural e apenas 10,2% de fontes renováveis.

Figura 1: Oferta de energia por fonte no mundo.

2013

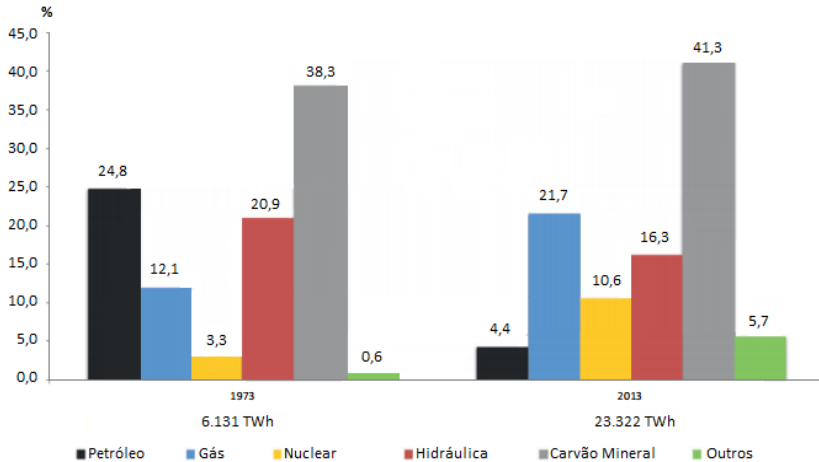
Total: 13.541 10<sup>6</sup> tep (toe)



Fonte: MME, 2016.

Por outro lado, a geração de energia elétrica no mundo, em 2013, foi de 23.322 TWh, sendo que o carvão mineral foi responsável por 41,3% do total, seguido pelo gás natural com 21,7%, pela energia hidráulica com 16,3% e pela fonte nuclear com 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.



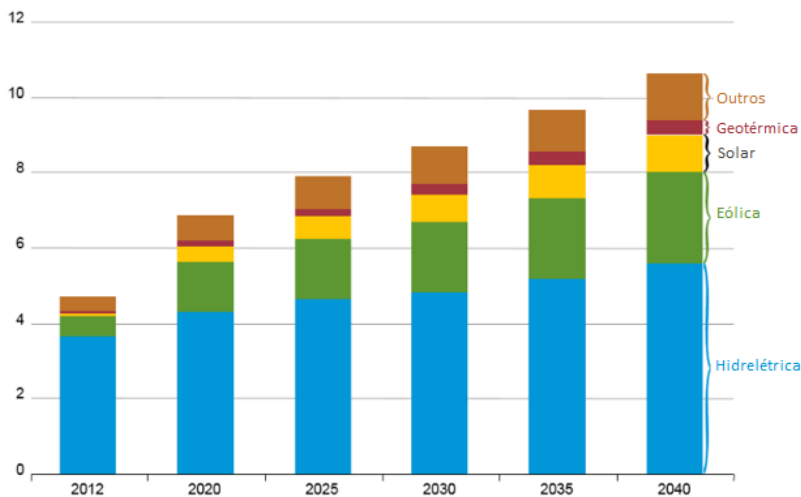
Fonte: MME, 2016.

Ao comparar os dados do ano de 1973 e 2013 da Figura 2, observa-se uma alteração na distribuição das fontes para a produção energia elétrica, particularmente um aumento percentual na oferta da energia nuclear, gás natural e carvão mineral, contrapondo a evolução da oferta de petróleo e da energia hidráulica. Tais números, mesmo com a redução da participação do petróleo, revelam a profunda dependência por combustíveis fósseis.

Diante deste quadro preocupante, associado aos estudos científicos que demonstram os impactos causados pelos gases emitidos com a queima dos combustíveis fósseis, tem crescido a busca por fontes alternativas de produção de energia limpa e sustentável que levam à redução da utilização dos recursos não renováveis.

A transição de um modelo de sistema de geração por outro, demanda 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.

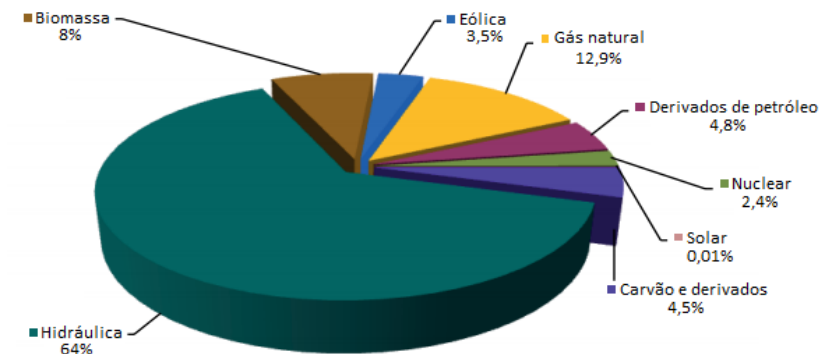


Fonte: EIA, 2016.

Ao analisar a situação do Brasil, depreende que esse é 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 de energia, enquanto que a média mundial é de 21,7% (MME, 2016).

Ainda, o Brasil possui a maior bacia hidrográfica do mundo, o que reflete na produção de energia elétrica, proveniente, na sua maior parte, de 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.

Apesar disso, nas principais concentrações urbanas, boa parte do potencial hidráulico já foi aproveitado, exigindo desse modo investimentos na expansão das redes de transmissão e distribuição, o que conseqüentemente contribui para o aumento nos custos da geração de energia elétrica. É nesse contexto que a expansão de outras fontes renováveis, como a energia solar, por exemplo, deve ser inserida (TORRES, 2012).

O potencial de aproveitamento da energia solar no Brasil é muito grande. Segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), as áreas localizadas no Nordeste brasileiro têm valores de radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no deserto de Mojave, Califórnia (SALAMONI, 2009).

As cartas de radiação solar global diária, média mensal elaboradas pelo Atlas Solarimétrico do Brasil, mostram que a radiação solar no Brasil varia entre 8 a 22 MJ/m<sup>2</sup>.dia. Segundo Rütther (2012), seriam necessários apenas 0,045% da área total do território nacional, ou seja, 3.844 km<sup>2</sup> em painéis fotovoltaicos, para gerar a energia consumida no Brasil em 2010, que foi de 455,7 TWh, o que revela que esta fonte renovável de energia tem muito a oferecer à matriz energética nacional, apesar de ainda ter uma participação muito incipiente e nem ser contabilizada de forma isolada nos relatórios setoriais anuais.

Segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (PDE 2024), a geração de energia elétrica fotovoltaica no Brasil, alcançará 7.000 megawatts (MW) até 2024. Segundo o planejamento para

a próxima década, a potência instalada de eletricidade a partir do sol representará quase 4% da potência total brasileira de 2024 (MME, 2015).

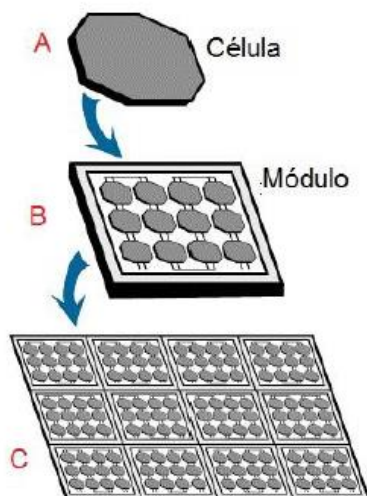
Destaca-se o potencial de crescimento da energia solar, que pode ser aproveitada de diferentes formas, incluindo a fotovoltaica. A tecnologia fotovoltaica se apresenta como uma tendência ideal para a geração de energia, por ser uma fonte inesgotável, renovável, não poluente e com possibilidade de geração distribuída. É um método de produção sustentável, que visa trazer benefícios tanto ambientais, quanto energéticos (SANTOS, 2009).

## 4.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

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 módulo fotovoltaico que atua utilizando o princípio do efeito fotovoltaico. Tal efeito foi relatado pela primeira vez pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, num eletrodo imerso em líquido condutor (ABINEE, 2012). No efeito fotovoltaico, os elétrons gerados são transferidos entre bandas diferentes (i.e., das bandas de valência para bandas de condução) dentro do próprio material, resultando no desenvolvimento de uma tensão elétrica entre dois eletrodos (ABINEE, 2012). De forma simplificada, é quando pela interação da radiação solar com um material semicondutor ocorre a liberação e movimentação de elétrons por este material, causando uma diferença de potencial. Essa energia (?) É obtida de uma maneira estática e silenciosa, pois não há movimentação mecânica, necessitando de manutenção mínima (RÚTHER, 2004). Complementando esta informação, Nascimento (2014) afirma que “uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado “Efeito Fotovoltaico””.

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos feitos de materiais semicondutores, onde cada módulo apresenta um conjunto de células fotovoltaicas (Figura 5), responsáveis por executar a conversão da luz solar incidente em energia elétrica, sendo que os fótons da luz estimulam os elétrons a saltar para a camada de condução, que sob condições favoráveis originará tensão e corrente elétrica. A radiação proveniente do sol fornece a energia necessária para o elétron saltar para a banda de condução. É neste movimento entre a lacuna e a banda de condução que a energia elétrica é gerada e “coletada” pelos condutores dos módulos (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995).

Figura 5: Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B) e um conjunto de módulos fotovoltaicos (C).



Fonte: BRASIL, 2010.

Os módulos fotovoltaicos são considerados um meio econômico e ambientalmente amigável na geração de eletricidade, uma vez que a substituição de combustíveis fósseis pelos módulos fotovoltaicos traz diversas vantagens potenciais, como a redução da emissão de gases agentes do efeito estufa e a redução da emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) (GIACCHETA *et al.*, 2013).

Como o funcionamento dos módulos fotovoltaicos depende diretamente da disponibilidade da luz solar, quanto maiores os níveis de irradiação, maior também a quantidade de energia gerada. Embora a densidade energética deste tipo de energia seja baixa em relação aos combustíveis fósseis, a disponibilidade é muito maior, já que a radiação que atinge o globo terrestre em 12 minutos seria suficiente para abastecer todo o planeta por um ano (RÜTHER, 2004).

A tecnologia fotovoltaica, por sua vez, baseia-se em um processo em que um material semicondutor é adaptado para liberar elétrons, as partículas negativamente carregadas que formam a base da eletricidade. Todas as células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de tais semicondutores, uma positiva e outra negativamente carregada. Quando a luz do sol atinge o semicondutor, o campo elétrico entre a junção das

duas camadas inicia um fluxo de energia, gerando corrente contínua. Quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de eletricidade, entretanto, um sistema fotovoltaico não precisa de radiação solar direta para operar, ele também gera eletricidade em dias nublados, sendo que neste caso, a quantidade de energia gerada depende da densidade das nuvens. Devido à reflexão da luz do sol, dias com poucas nuvens podem resultar em mais produção de energia do que dias completamente claros.

Entre os materiais semicondutores disponíveis, o mais empregado na produção dos módulos é o silício, que atinge cerca de 95% de todos os módulos fotovoltaicos no mundo (DGS, 2008). O uso predominante desse material para a fabricação de módulos se deve ao bom domínio de sua tecnologia, ao seu alto rendimento relativo, e à sua abundância na superfície da Terra (CHIVELET, 2010).

Existem três tecnologias aplicadas para a produção de módulos fotovoltaicos, classificados em três gerações de acordo com seu material e suas características. A classificação por geração divide os módulos em três grupos: os de 1ª, 2ª e 3ª geração.

### 1ª Geração – Módulos de silício cristalino (c-Si)

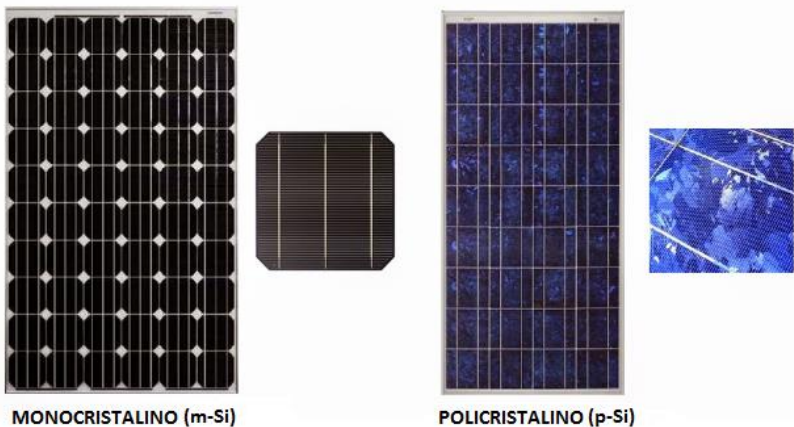
A primeira geração é composta por silício cristalino (c-Si), que se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si).

Os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) são obtidos a partir de fatias de um único cristal, o que os tornam bastante eficientes, porém muito mais caros por seu processo elaborado de fabricação (SANTOS, 2013). Sua rede cristalina apresenta poucas imperfeições, sendo praticamente homogênea (CRESESEB, 2010).

Por outro lado, de acordo com Rüther (2004), os módulos fotovoltaicos de silício policristalino (p-Si) possuem uma eficiência menor que a do silício monocristalino, mesmo sendo fabricado pelo mesmo material. Isso, pois, em vez de ser formado por um único cristal, é fundido e solidificado, resultando em um bloco com grandes quantidades de grãos ou cristais, concentrando maior número de defeitos. Em função desses, o seu custo é mais baixo quando comparados aos módulos monocristalino. Ambos são retratados na Figura 6 a seguir.



Figura 6: Representação dos módulos de 1ª geração.



Fonte: SOLAR, 2016.

## 2ª Geração – Módulos de filmes finos

A segunda geração, também chamada de filmes finos, possui uma ou mais camadas do material fotovoltaico depositada sobre um substrato (vidro, aço inoxidável, plástico, etc.). O filme, por sua vez, pode ser feito de diferentes materiais, como silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Em comparação às demais tecnologias fotovoltaicas, os filmes finos apresentam a grande vantagem de consumir menos matéria prima e menos energia em sua fabricação, tornando muito mais baixo o seu custo. Além disso, a reduzida complexidade na fabricação torna mais simples os processos automatizados, favorecendo sua produção em grande escala (VILLALVA & GAZOLI, 2012). Apesar dessa vantagem, “convertem fótons em elétrons de forma menos eficiente do que as células de cristais únicos de silício” (GORE, 2010). Além disso, por conterem metais tóxicos em sua composição, torna-se mais complexa sua destinação final ambientalmente adequada.

Figura 7: Representação de um módulo de 2ª geração.

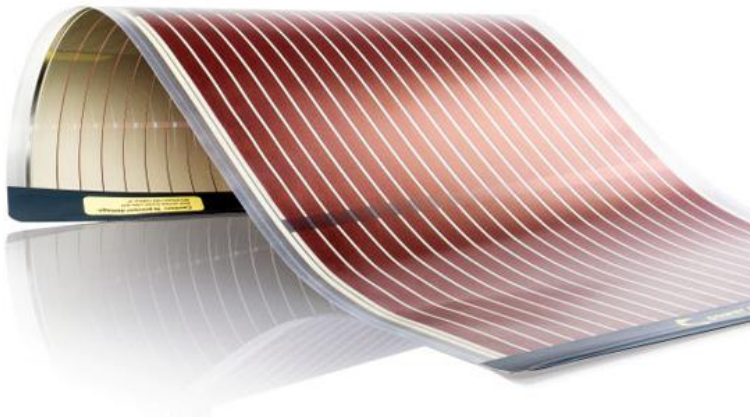


Fonte: SOLAR, 2016.

### 3ª Geração

A terceira geração, é definida pelo IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos como: módulos que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar que os módulos baseados em um único *band-gap* eletrônico. De forma geral, a terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade (IEEE, 2014). Alguns exemplos são os módulos de CPV (*concentrator photovoltaics*), os módulos DSSC (*Dry-sensitised solar cell*), as células orgânicas e as células híbridas. O CPV utiliza lentes para focar a luz do sol e utiliza células de silício ou compostos do grupo III-V, como GaAs. Os DSSC são módulos sensibilizados por corantes e são compostos por materiais orgânicos e inorgânicos como  $\text{TiO}_2$ . As células orgânicas são compostas geralmente por materiais poliméricos ou pequenas moléculas orgânicas (VÉRONIQUE MONIER, 2011). Finalmente, as células híbridas são células que combinam o silício cristalino e silício amorfo (WU et al., 2005).

Figura 8: Representação de um módulo de 3ª geração.



Fonte: SOLAR, 2016.

Na Tabela 1, encontra-se uma relação entre os tipos de módulos e suas características.

Tabela 1: Especificações dos módulos fotovoltaicos de 1ª e 2ª geração.

Tipo de Módulo	Silício cristalino	Filmes finos		
		a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Peso por módulos (kg)	5 a 28	11,7 a 20,0	9 a 15	10,2 a 20,0
Capacidade	10 a 300 Wp	60 a 120 Wp		
Tamanho	Geralmente entre 1,4 e 1,7 m <sup>2</sup> , podendo chegar a 2,5 m <sup>2</sup>	1,4 a 5,7 m <sup>2</sup>	0,6 a 1,0 m <sup>2</sup>	

Fonte: VÉRONIQUE MONIER, 2011.

Observando-se o exposto na Tabela 1, a tecnologia de silício cristalino é a que possui o maior potencial energético. O desenvolvimento das outras gerações tem diminuído essa diferença e a tendência é que a tecnologia de filmes finos ultrapasse a de silício cristalino no futuro (DIAS, 2015).

Os materiais usados na composição de módulos fotovoltaicos são apresentados na Tabela 2 a seguir de acordo com sua tecnologia.

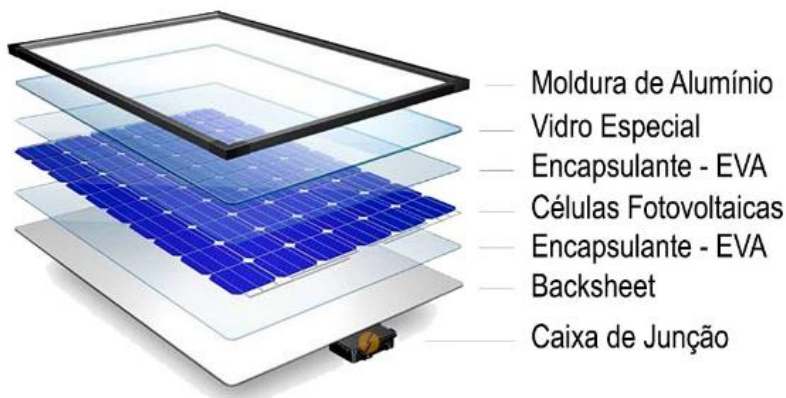
Tabela 2: Composição dos módulos fotovoltaicos de 1ª e 2ª geração.

Material	1ª geração - Silício cristalino	2ª geração - Filmes finos		
	c-Si	a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Vidro	74%	90%	95%	85%
Alumínio	10%	< 1%	< 1%	12%
Silício	3%	< 0,1%	0%	0%
Polímeros	6,50%	10%	3,50%	6%
Zinco	0,12%	< 0,1%	0,01%	0,12%
Chumbo	< 0,1%	< 0,1%	< 0,01%	< 0,1%
Cobre	0,60%	0%	1%	0,85%
Índio	0%	0%	0%	0,02%
Selênio	0%	0%	0%	0,03%
Telúrio	0%	0%	0,07%	0%
Cádmio	0%	0%	0,07%	0%
Prata	< 0,006%	0%	< 0,01%	0%

Fonte: Adaptado de VÉRONIQUE MONIER, 2011.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por diversas camadas, como pode ser observado na Figura 9. Será descrito a seguir as camadas que compõe um módulo fotovoltaico de silício cristalino, uma vez que é o semiconductor mais empregado atualmente.

Figura 9: Principais materiais usados na fabricação de módulos fotovoltaicos.



Fonte: SOLAR, 2016.

A primeira camada de um módulo fotovoltaico é feita de um vidro temperado especial, que é ultrapuro e possui baixo teor de ferro, desenvolvido especialmente para refletir menos e deixar o máximo de luz passar através dele. Em seguida, é empregado o material encapsulante, conhecido como EVA (*Ethylene Vinyl Acetat*), que tem como finalidade proteger o módulo fotovoltaico contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade, assegurando que o máximo de incidência solar atinja os módulos (SOLAR, 2016).

Com a finalidade de transmitir o fluxo de elétrons (corrente elétrica), emprega-se diferentes contatos metálicos. Os contatos elétricos são componentes importantes, principalmente quando se trata da questão da reciclagem, pois esses podem conter metais de interesse econômico como o cobre e a prata. A reutilização destes compostos pode significar grande economia de energia, corte de gastos e redução nos impactos ambientais (DIAS, 2015).

A célula fotovoltaica, responsável por fazer a transformação da luz do sol em energia elétrica, é então, colocada em conjunto com os contatos elétricos, entre duas camadas de material encapsulante (BROUWER; GUPTA; HONDA, 2011). A camada traseira da célula recebe o nome de *blacksheet* e é responsável por proteger os componentes internos do módulo e por agir como um isolante elétrico (SOLAR, 2016).

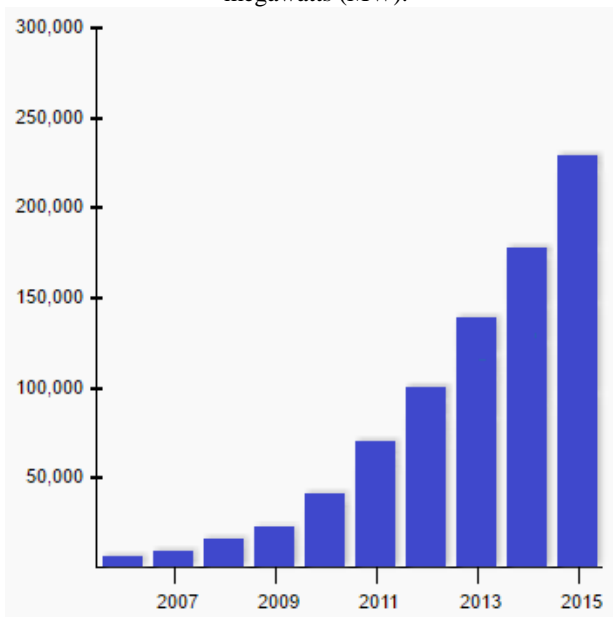
Por fim, ao redor de um módulo fotovoltaico é adicionada uma moldura geralmente feita de alumínio, que confere resistência e leveza à estrutura do painel. Para selar a interface entre o vidro e a moldura de alumínio frequentemente são empregados seladores de silicone ou polibutil (JOHN PERN, 2008).

### 4.3. A IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM NO SETOR FOTOVOLTAICO

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA – International Renewable Energy Agency), a capacidade de geração de energia renovável aumentou em 8,3% ou 153 GW em 2015, representando a maior taxa de crescimento já registrada. A capacidade de geração de energia solar fotovoltaica contribuiu com 47 GW deste aumento, atingindo 222 GW em 2015, o que significa um aumento de 26,85% sobre os 175 GW produzidos em 2014 (IRENA and IEA-PVPS, 2016). Para se ter uma ideia, a capacidade de geração instalada da usina de Itaipu é de 14 GW.

A Figura 10 mostra o crescimento exponencial na capacidade instalada acumulada de módulos fotovoltaicos entre 2006 e 2015. A indústria fotovoltaica representa hoje o maior crescimento dentre as tecnologias de uso de fontes renováveis ao nível mundial.

Figura 10: Evolução da capacidade instalada acumulada no mundo, em megawatts (MW).

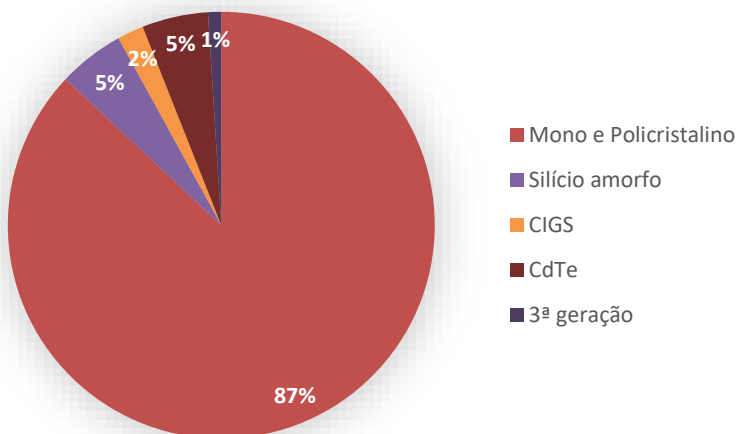


Fonte: IEA, 2014.

A Figura 11 ilustra a participação das tecnologias fotovoltaicas na produção dos módulos. No mercado, atualmente, 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; IEA-PVPS, 2016).

Dentre as tecnologias de filmes finos e da 3ª geração, alguns dos elementos utilizados são altamente tóxicos (Cd, Se e Te) ou muito raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos, o que dificulta o uso mais intensivo dessas tecnologias (RÜTHER, 2004; BAGNALL e BORELAND, 2008).

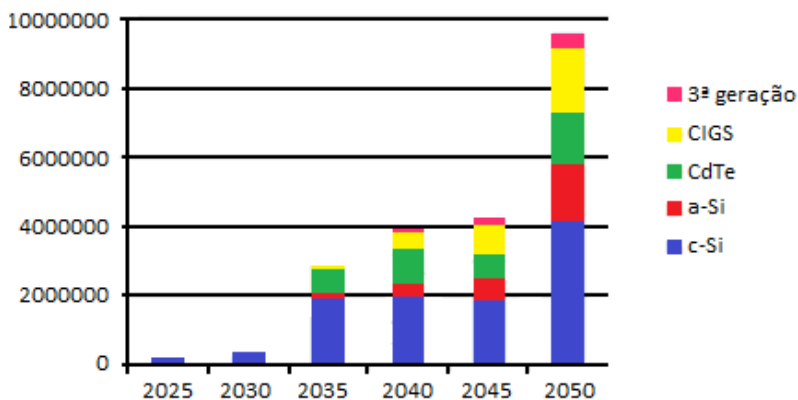
Figura 11: Distribuição das tecnologias fotovoltaicas em 2020.



Fonte: IRENA e IEA-PVPS, 2011.

Dessa forma, a tendência é que os módulos de silício cristalino sejam maioria na futura geração dos resíduos fotovoltaicos, conforme exemplifica a projeção da Figura 12, baseada no consumo europeu (VÉRONIQUE MONIER, 2011; TYAGI *et al.*, 2013).

Figura 12: Projeção de resíduos gerados provenientes dos módulos fotovoltaicos (em toneladas).



Fonte: Adaptado de VÉRONIQUE MONIER, 2011.

O principal problema destas quantidades de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos é, de acordo com a literatura existente, que, se não descartados corretamente e não receberem o tratamento adequado, eles podem causar impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde humana. Tais impactos são associados a lixiviação de chumbo e cádmio, perda de recursos convencionais (principalmente vidro e alumínio) e perda de metais raros (prata, índio, gálio e germânio) (VÉRONIQUE 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 (VÉRONIQUE MONIER, 2011). 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 (VÉRONIQUE 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 (VÉRONIQUE MONIER, 2011).

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 (VÉRONIQUE MONIER, 2011).

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 (VÉRONIQUE MONIER, 2011).

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. Um estudo realizado pelo projeto FORWAST, que avalia os impactos ambientais de uma variedade de resíduos e opções de tratamento, cita a reciclagem de alumínio e os resíduos de vidro como sendo um dos maiores potenciais para reduzir os impactos ambientais dos resíduos (SCHMIDT, 2009).

#### 4.4. LOGÍSTICA REVERSA

Os primeiros conceitos de logística reversa surgiram no final da década de 70 e estão associados à preocupação com o meio ambiente. Ginter e Starling (1978 *apud* FELIZARDO, 2005) utilizaram o termo “canais de distribuição reversos”, no qual o foco era a reciclagem e as vantagens econômicas e ecológicas, que eram fator fundamental para a viabilidade econômica na recuperação dos materiais.

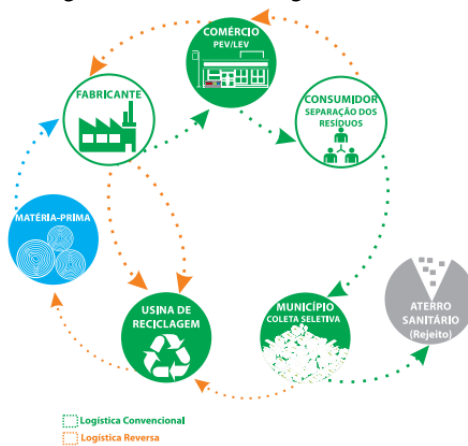
O *Reverse Logistics Executive Council* (RLEC), uma organização profissional não lucrativa, define a logística reversa de maneira mais ampla e detalhada:

“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.” (2003 *apud* 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 (MIGUEZ et. al., 2007).

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 13.

Figura 13: Sistema de logística reversa.



Fonte: MMA, 2014.

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 (LACERDA, 2002). 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 feita a disposição final ambientalmente adequada.

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 está 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 (FLEISCHMANN et al., 1997).

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 (BRITO e DEKKER, 2002). 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.

#### 4.5. POLÍTICAS ADOTADAS PELA UNIÃO EUROPEIA

Atualmente, apenas a União Europeia tem adotado medidas regulamentares para a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos. A maioria dos países ainda classifica este tipo de resíduo como resíduo geral ou industrial (IRENA; IEA-PVPS, 2016). A União Europeia, por sua vez, define os módulos fotovoltaicos como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), dessa forma, a gestão e a classificação de resíduos de módulos fotovoltaicos é regulamentada pela Diretiva REEE (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

A Diretiva REEE surgiu com o intuito de resolver os problemas que a falta de gestão dos REEE causava no ambiente, visando promover a reciclagem, minimizar o desperdício e estimular o desenvolvimento de produtos mais ecológicos para o futuro. A primeira Diretiva REEE (2002/96/CE) entrou em vigor em janeiro de 2003, prevendo a criação de um sistema de coleta, objetivando os consumidores a retornarem seus resíduos gratuitamente (PARLAMENTO E CONSELHO EUROPEU, 2003).

A definição de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) é dada pela Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu em seu artigo 3°:

Art. 3° a) “Equipamentos eletros e eletrônicos”, ou “EEE”: os equipamentos cujo adequado funcionamento depende de correntes eléctricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1000 V para corrente alterna e 1500 V para corrente contínua.

A definição de Resíduos Elétricos e Eletrônicos é portanto, seguindo a mesma Diretiva:

Art. 3º b) “Resíduos de equipamentos eletros e eletrônicos” ou “REEE”: os equipamentos eletros ou eletrônicos que constituem resíduos, nos termos da alínea a) do artigo 1º da Directiva 75/442/CEE, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte do produto no momento em que este é descartado.

Em dezembro de 2008, a Comissão Europeia propôs a revisão da Directiva 2002/96/CE, a fim de enfrentar o rápido aumento do fluxo de resíduos. A nova Directiva REEE 2012/19/UE entrou em vigor em 14 de fevereiro de 2014 e pela primeira vez a gestão dos resíduos de módulos fotovoltaicos foi incluída em uma legislação (IRENA; IEA-PVPS, 2016). Todos os 28 membros da União Europeia são agora, responsáveis por estabelecer um regime de coleta e tratamento para os módulos fotovoltaicos em conformidade com a Directiva REEE (PARLAMENTO E CONSELHO EUROPEU, 2012). Os produtores que desejam expor seus produtos no mercado da União Europeia, são legalmente responsáveis pela gestão do fim de vida dos mesmos, não importando onde suas fábricas estejam localizadas (COMISSÃO EUROPEIA, 2013).

A Directiva REEE segue determinadas metas de coleta, recuperação e reciclagem dos resíduos, descritos na Tabela 3. A meta de coleta deve subir de 45% em 2016 para 65% em 2018. Já, para a meta de reciclagem e recuperação, espera-se um aumento de 75% para 80% de recuperação e 65% para 70% de reciclagem, para o mesmo período de tempo (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Tabela 3: Metas anuais da Directiva REEE.

	Metas Anuais		
	Coleta	Reciclagem	Recuperação
Primeira Directiva REEE (2002/96/EC)	4 kg/habitante	65%	75%
Directiva REEE revisada (2012/19/UE) até 2016	4 kg/habitante	65%	75%
Directiva REEE revisada (2012/19/UE) de 2016 a 2018	45%	70%	80%
Directiva REEE revisada (2012/19/UE) a partir de 2018	65%	80%	85%

Fonte: (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Além disso, a Diretiva determina aos fabricantes que todos os equipamentos enquadrados na legislação sejam etiquetados para informar aos usuários de que o produto deve ser reciclado após o ciclo de vida

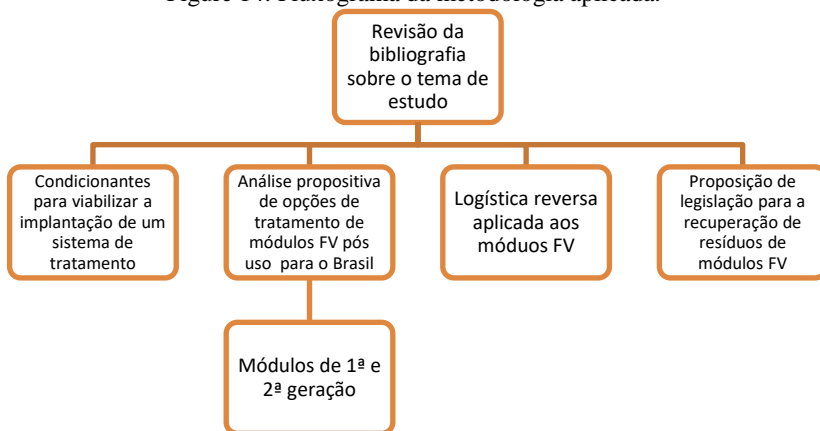
A Diretiva também estabelece requisitos mínimos que os países membros podem ajustar de acordo com sua própria legislação. Eles podem, por exemplo, definir e acrescentar requisitos mais rigorosos.

Até o momento, todos os países membros da União Europeia incorporaram a Diretiva REEE na sua legislação nacional, havendo inserção de determinados regulamentos específicos de cada país (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

## 5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os resultados finais do presente estudo, a metodologia aplicada neste trabalho seguiu as etapas expostas no fluxograma abaixo.

Figure 14: Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio de um levantamento de dados através de pesquisa bibliográfica e documental, foi possível selecionar o maior número de informações úteis e confiáveis com a temática a respeito dos resíduos de módulos fotovoltaicos.

A partir das informações coletadas sobre o processo de geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, a composição, as tecnologias disponíveis e a vida útil dos módulos fotovoltaicos, bem como a importância do processo de reciclagem no setor fotovoltaico, a legislação vigente na União Europeia sobre o tema e o conceito de logística reversa aplicada aos REEE, foi possível desenvolver os objetivos específicos deste trabalho.

Com referência aos condicionantes, esta etapa buscará discutir alguns fatores que podem influenciar na viabilidade de um sistema de tratamento de reciclagem de resíduos dos módulos fotovoltaicos, tais como: localização, viabilidade econômica, mão de obra qualificada, existência de legislação, política de incentivo e valorização do produto reciclado.

A etapa que diz respeito à análise propositiva de opções de tratamento de módulos fotovoltaicos abordará dois métodos empregados atualmente na reciclagem dos módulos, visando a aplicabilidade no Brasil.

A possibilidade de aplicação da logística reversa para os módulos fotovoltaicos, irá considerar a importância desta abordagem a nível ambiental, social e econômico aliado aos fatores críticos que influenciam na eficiência desse processo. Será apresentado, com base no estudo de logística reversa de equipamentos eletrônicos do Brasil, uma proposta de implantação desse sistema para os módulos fotovoltaicos.

Por fim, tendo como referência a legislação vigente na União Europeia, em conjunto com a necessidade de elaborar uma normatização específica para o Brasil, serão apresentadas sugestões com medidas essenciais que devem estar previstas em uma legislação que trate da reciclagem e do reaproveitamento dos resíduos de módulos fotovoltaicos.



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. FATORES CONDICIONANTES QUE VIABILIZAM A INSERÇÃO DE EMPRESAS DE RECICLAGEM FOTOVOLTAICA

Alguns fatores que podem viabilizar uma proposta de implantação de um sistema de tratamento para a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos, no Brasil, foram relacionados abaixo:

#### Localização

A implantação das fábricas de reciclagem deve estar situadas nas proximidades das usinas geradoras de energia elétrica a partir da energia solar, priorizando as regiões que concentram os maiores índices de equipamentos fotovoltaicos a serem reciclados. A proximidade facilita o transporte dos resíduos, bem como a destinação do material reciclado transformado em matéria prima, reduzindo custos de transporte.

#### Viabilidade econômica

A viabilidade econômica é fator determinante para propiciar a reciclagem. A viabilidade econômica está diretamente ligada à sustentabilidade do negócio e do meio ambiente, que se relaciona com os custos sociais do desenvolvimento e a preservação do planeta para as futuras gerações. A viabilidade econômica deve considerar o desenvolvimento da cultura da sustentabilidade ambiental e a consequente valorização econômica dos produtos reciclados.

#### Existência de mão de obra qualificada

Por ser essencial para a viabilidade do negócio, a oferta de mão de obra e sua qualificação deve ser considerada como um fator de responsabilidade social. Mão de obra especializada garante o aproveitamento adequado dos produtos e produtividade dos empreendimentos.

#### Legislação

A existência de uma legislação com propósito de classificar os resíduos fotovoltaicos como REEE, prevendo as normas técnicas a serem utilizadas no processo de tratamento dos produtos e sua destinação, incluindo punições severas em casos de infrações legais, além de punição

e recuperação ambiental em casos de acidentes e de descarte inadequado dos resíduos fotovoltaicos.

### Política de incentivos

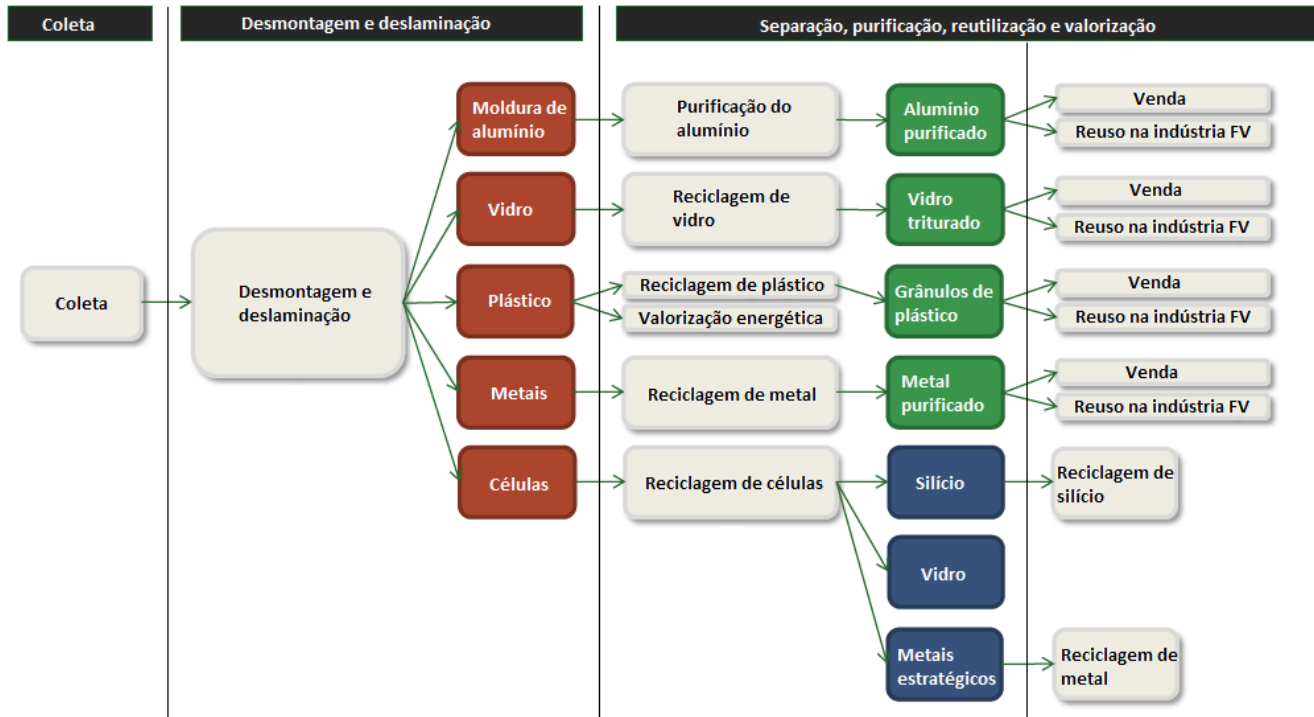
Toda tecnologia nova possui alto custo de produção sendo, muitas vezes, fator de inibição de sua implantação. Neste sentido, para que a mesma seja viabilizada é necessário uma política de incentivos. A reciclagem fotovoltaica deve ser encarada neste contexto, e os incentivos devem estar previstos em lei, para estimular soluções proativas que se antecipam aos problemas.

## 6.2. ANÁLISE PROPOSITIVA DE TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA O BRASIL

Embora existam diversas opções de tratamento de resíduos fotovoltaicos em desenvolvimento, este trabalho irá abordar a reciclagem, uma vez que é a opção que envolve a separação dos módulos em partes homogêneas e reutilizáveis dentre suas várias frações. Atualmente, a reciclagem é a principal escolha dos interessados do setor, justamente porque a importância de reciclar está vinculada à redução da quantidade de matéria prima utilizada, destacando-se como um aspecto sustentável e indispensável para um setor que produz energia limpa.

Conforme o levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, constatou-se que a reciclagem dos módulos fotovoltaicos pode ser dividido em diferentes etapas, como mostra a Figura 15 abaixo:

Figura 15: Etapas de reciclagem dos componentes de módulos fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O., 2012.

Como exposto na Figura 15, as substâncias obtidas no processo de reciclagem podem ser valorizadas, incorporadas no ciclo produtivo e novamente recicladas. A Tabela 4 mostra a destinação que pode ser dada a cada componente ao final do processo:

Tabela 4: Opções de destinação dos componentes.

<b>Componente</b>	<b>Reciclagem e valorização</b>
Vidro	Indústria de vidro/Indústria FV Indústria de lã de vidro Construção
EVA	Reutilização na indústria química Recuperação de energia da incineração
Semicondutor (1ª geração)	Wafer com eficiência suficiente para produção de células FV Reutilização na indústria FV como semicondutor Utilização como agregados para forno de fundição metalúrgica
Semicondutor (2ª geração)	Reutilização com seu nível de pureza original Fabricação de novas células FV
Metais estratégicos	Reutilização com seu nível de pureza original
Alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original

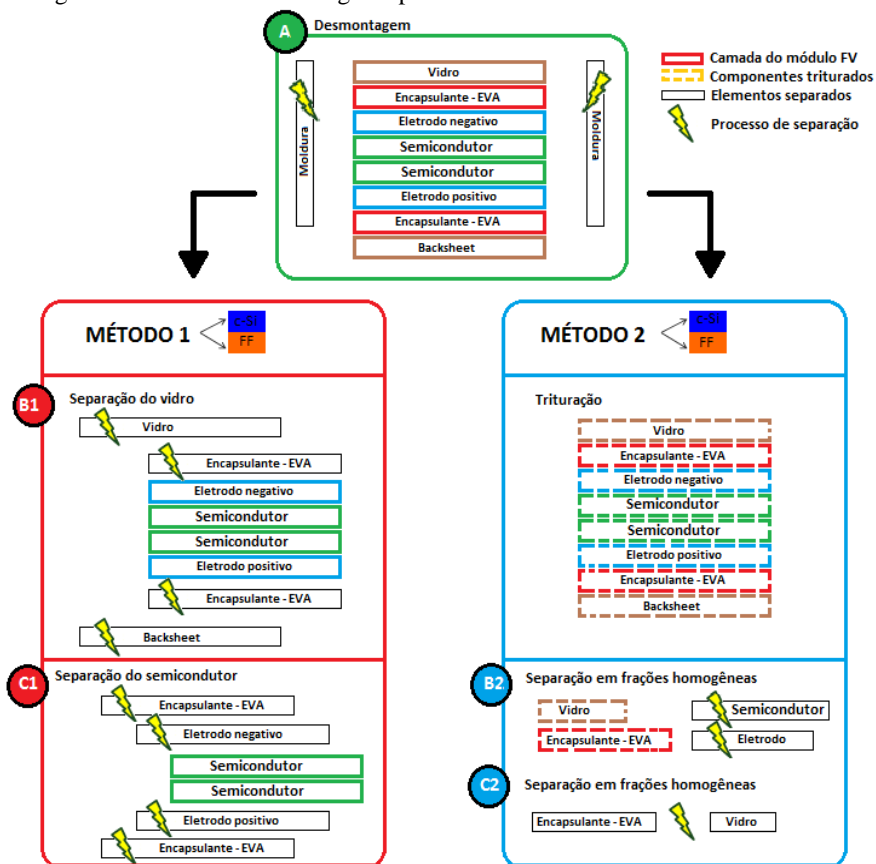
Fonte: Adaptado de BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O., 2012.

Do estudo bibliográfico depreende-se que existe uma variedade de tecnologias relacionadas aos processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Considerando a realidade brasileira, merecem destaque dois métodos que podem ser implantados no país.

O primeiro método consiste na separação do vidro do resto do módulo por degradação das propriedades de laminação do material encapsulante (normalmente EVA).

O segundo método consiste na desmontagem da moldura e na trituração do módulo, separando as substâncias em fluxos homogêneos, incluindo os semicondutores.

Figura 16: Métodos de reciclagem aplicados aos módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O., 2012.

Será analisado a seguir os processos envolvidos em cada método de reciclagem exposto na Figura 16. Ressalta-se que a desmontagem do módulo acontece da mesma forma para ambos os módulos de silício cristalino e de filmes finos. As molduras de alumínio são separadas do restante do módulo por um processo mecânico e encaminhadas para processos de reciclagem de metal.

A começar pelo Método 1, para os módulos de silício cristalino, a separação do vidro do material encapsulante acontece através de um processo térmico (pirólise), assim como a separação do material encapsulante do *backsheet*. Já, nos módulos de filmes finos, essas mesmas separações ocorrem por um processo puramente químico.

Ainda no Método 1, acontece a separação do material semicondutor dos eletrodos negativo e positivo dos módulos. Esta etapa, para ambos os módulos de 1ª e 2ª geração, ocorre através de processos químicos.

O Método 2, diferente do anterior, utiliza meios para triturar os componentes envolvidos em um módulo. A fração de vidro triturada, por exemplo, pode ser misturada com outras frações de vidros reciclados, podendo ser utilizado como isolante térmico nas indústrias de espuma ou fibra de vidro. As frações do polímero (EVA), por sua vez, podem ser utilizadas para a geração de energia sob a forma de calor ou eletricidade (*waste-to-energy*<sup>1</sup>).

A separação das frações homogêneas (B2), consegue separar, primeiramente, os materiais semicondutores dos eletrodos, permanecendo ainda triturados, o vidro e o material encapsulante. A separação do material semicondutor dos eletrodos, acontece por meio de um processo mecânico para os módulos de silício cristalino e de um processo químico para a tecnologia de filmes finos.

Finalmente, a segunda parte (C2) consegue separar o material encapsulante do vidro. Essa etapa acontece através de uma combinação de processos mecânicos e térmicos para os módulos de 2ª geração. Para os módulos de silício cristalinos, não há dados referentes da etapa.

É importante destacar que os principais componentes dos módulos c-Si conseguem ser recuperados em mais de 85%, enquanto que para os módulos de filmes finos é possível alcançar 90% de recuperação do vidro e 95% de recuperação do material semicondutor.

---

<sup>1</sup> Processo de geração de energia sob a forma de calor e/ou eletricidade proveniente do tratamento primário de resíduos.

Os processos envolvidos em cada fase de cada método citado (B1, C1, B2, C2) são expostos na Tabela 5.

Tabela 5: Processos envolvidos em cada fase dos métodos citados.

<b>Tecnologia</b>	<b>Fase</b>	<b>Método 1</b>	<b>Método 2</b>
c-Si Cristalino	B	Processo térmico	Processo mecânico
	C	Processo químico	Dados não disponíveis
Filmes Finos	B	Processo químico	Processo químico
	C	Processo químico	Processo mecânico Processo térmico

Fonte: Adaptado de BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O., 2012.

### 6.3. LOGÍSTICA REVERSA APLICADA AOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Apesar de atualmente o Brasil ainda não ser destaque na geração de energia elétrica usando placas solares fotovoltaicas, é inevitável considerar a capacidade que o país possui de, no futuro, ser um grande produtor desse tipo de energia. Diante desse cenário, especula-se que num futuro próximo haverá considerada quantidade de resíduo gerado pelo fim de vida útil dos módulos empregados para a conversão da energia solar em energia elétrica.

Dessa forma, é imprescindível uma visão proativa e desde já começar a pensar em um processo de logística reversa associada aos módulos fotovoltaicos, sustentado no princípio da importância ambiental, uma vez que o reaproveitamento dos resíduos gerados diminui a poluição dos ecossistemas, aumentando a vida útil dos aterros sanitários com a redução de rejeitos ali depositados.

Ao decidir aplicar o sistema de logística reversa, além de agregar valor ao produto, também há geração de novos empregos e renda. Além disso, o processo de logística reversa pode trazer consideráveis retornos para os fabricantes de módulos fotovoltaicos, pois o reaproveitamento dos materiais trazem ganhos que estimulam cada vez mais novas iniciativas, transformando materiais que seriam inutilizados em matérias primas, reduzindo assim, os custos das empresas e dos produtos finais.

A logística reversa associada aos resíduos de módulos fotovoltaicos possui também a sua importância social pela geração de oportunidades de empregos em todos os setores da cadeia produtiva, estimulando também a conscientização da população quanto às questões

ambientais e de saúde relacionadas a determinados componentes presentes nos módulos.

Para este estudo, apresenta-se uma proposta de modelagem para a logística reversa de módulos fotovoltaicos baseando-se em alguns aspectos do estudo da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2012):

- A responsabilidade pela execução da política de logística reversa será dos fabricantes e dos consumidores dos módulos fotovoltaicos;
- O sistema será estruturado para lidar com a coleta integral dos módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil;
- Recolhimento e entrega dos módulos nas indústrias de reciclagem;
- Associação obrigatória de fabricantes e importadores a uma ou mais organizações gestoras que gerenciarão o sistema de logística reversa e farão a interface com as autoridades competentes observados os parâmetros legais;
- Realização de campanhas de conscientização para a importância de recolhimento onde a produção de energia fotovoltaica esteja mais disseminada.

O transporte dos módulos até seu destino final será de responsabilidade do fabricante/importador, das usinas solares e das unidades autônomas produtoras de energia, sendo compartilhada entre as três partes.

A indústria de reciclagem terá responsabilidade de repor o material reciclado no mercado ou dá a devida destinação final ao resíduo, cumprindo o licenciamento ambiental e normas técnicas.

Para a implantação de um sistema desse porte, ressalta-se a responsabilidade que cada um dos setores deve ter para que o processo de logística reversa desenvolva-se com harmonia e flexibilidade:

#### Consumidor:

- Deve solicitar a retirada do módulo fotovoltaico no local.

#### Fabricante/Importador:

- Arcar com a parte que lhe cabe dos custos de implantação e operação do sistema de logística reversa;
- Habilitar-se como tal ou associar-se a uma organização gestora.



#### Organização Gestora (caso houver):

- Processar 100% do resíduo que entrar no seu sistema;
- Gerenciar a logística de recolhimento dos materiais;
- Contratar e acompanhar o serviço de reciclagem;
- Informar fluxo do processo de logística aos órgãos fiscalizadores.

#### Indústria de Reciclagem:

- Certificar-se junto aos órgãos fiscalizadores;
- Realizar a reciclagem e disposição final correta;
- Prover informações de performance do processo.

#### Poder Público:

- Atribuir e fiscalizar as metas de reciclagem;
- Regular e incentivar os recicladores para ganho de performance no processo (certificação);
- Prover incentivos a fabricação de produtos com maior conteúdo de reciclados, recicláveis e facilidade de reciclagem;
- Lançar editais para incentivo a pesquisa e desenvolvimento de forma a promover o desenvolvimento de conhecimento e tecnologias relacionadas à cadeia logística reversa de resíduos fotovoltaicos;
- Prover financiamentos para infraestrutura de recicladoras;
- Promover conscientização sobre o tema.

Para que o desempenho do processo de logística reversa seja bem sucedido, Lacerda (2009) identificou alguns fatores que influenciam no desempenho desse sistema: eficiente sistema de controle, processos mapeados e padronizados, sistema de informação e controle, rede logística planejada e infraestrutura adequada e relações colaborativas entre fornecedores e consumidores.

Os fatores discutidos acima devem ser levados em consideração para garantir o sucesso da implantação do sistema de logística reversa. Todos os fatores também estão relacionados à sustentabilidade e interligados entre si, ou seja, caso um esteja deficiente, pode comprometer todo o processo da logística reversa.

#### 6.4. PROPOSIÇÃO DE LEGISLAÇÃO PARA RESÍDUOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Como já decorrido neste trabalho, o Brasil vive ainda uma fase incipiente de produção de energia elétrica a partir de módulos solares fotovoltaicas, entretanto, este cenário está disposto a mudar. A introdução de energia solar no país vem ganhando força com a existência de programas de estímulos que preveem sua expansão para o cenário futuro. A estimativa da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indica que até 2050, 13% de todo o abastecimento das residências no Brasil seja feita pelos módulos fotovoltaicos, abrindo uma grande perspectiva para o setor de energia solar no Brasil.

Justamente por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, o Brasil não dispõe de legislação específica sobre o assunto e que normatize a destinação dos resíduos fotovoltaicos. Na perspectiva de um crescimento significativo na produção de energia solar, teremos, em contra partida, o crescimento e a geração de resíduos fotovoltaicos, o que demanda a aprovação de leis específicas, para enfrentar o problema a médio e longo prazo e garantir medidas de prevenção ambiental, seja limitando a utilização de substâncias perigosas ou regulando a gestão dos resíduos fotovoltaicos, visando minimizar as consequências ambientais que os mesmos podem trazer.

Para que o Brasil antecipe-se aos problemas decorrentes deste crescimento, é fundamental que os poderes públicos (legislativo e executivo) a elaborem uma legislação moderna contemplando, prioritariamente, os seguintes dispositivos:

- A classificação dos resíduos fotovoltaicos como REEE;
- A vida útil mínima (?) dos módulos fotovoltaicos;
- Políticas de incentivo ao desenvolvimento de energias limpas e renováveis, com destaque para a energia solar fotovoltaica;
- A determinação para a implantação de um sistema de logística reversa;
- O Plano Diretor de desenvolvimento fotovoltaico considerando a potencialidade de incidência solar e as demandas das regiões;
- Obrigatoriedade de adoção de usinas de energia solar para os grandes empreendimentos imobiliários e industriais. (Ex: construções acima de determinada metragem devem possuir energia fotovoltaica);

- Punições para produtores de energia solar que deixem de cumprir as medidas socioambientais e de gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos, visando garantir a eficácia da Lei.
- Propor tratamento específico para a reciclagem que utilize as melhores técnicas disponíveis para valorização dos produtos, assegurando a proteção da saúde humana e do meio ambiente;
- Determine o fornecimento de informações sobre a identificação dos componentes e materiais, visando facilitar a gestão dos resíduos;
- Estabeleça a responsabilidade dos produtores/distribuidores em assegurar que os módulos, ao chegarem ao fim de sua vida útil, lhes possam ser entregues;
- A proibição de eliminação do resíduo que não tenha sido sujeito ao tratamento;
- Que o transporte do resíduo coletado deva ser efetuado de forma a proporcionar as melhores condições para reutilização, reciclagem e o confinamento de substâncias perigosas;
- A elaboração de normas complementares para o tratamento, incluindo a valorização, reciclagem e preparação para a reutilização do resíduo.

Atitudes proativas no que se refere a assuntos de tamanha magnitude são fundamentais para evitar que os impactos socioambientais ocorram sem que esteja estabelecido as devidas responsabilidades dos atores envolvidos.



## 7. CONCLUSÕES

A tecnologia de energia solar fotovoltaica vem desenvolvendo-se e consolidando-se no mercado como uma fonte acessível, inesgotável e mais limpa, gerando grandes benefícios a longo prazo. Além disso, sua manutenção é mínima, sua instalação não obriga grandes investimentos de transmissão e em países tropicais, como o Brasil, a utilização da energia solar é viável em praticamente todo o território. É imprescindível dizer que esta forma de geração de energia, dentro das inovações que visam um mundo mais sustentável, vem destacando-se como alternativa para suprir a demanda energética ao nível global. A geração de energia elétrica a partir da incidência solar, é convertida com o auxílio dos módulos fotovoltaicos, que se tornarão resíduos corriqueiros na sociedade contemporânea e com isso um problema a ser enfrentado.

Na perspectiva de evitar que a solução energética vire um problema ambiental, este trabalhou preocupou-se em trazer alternativas viáveis para gerenciar a questão dos resíduos fotovoltaicos futuros. Os métodos de reciclagem abordados, porém, não limita as demais técnicas que estão em desenvolvimento para a separação e reciclagem dos componentes dos módulos fotovoltaicos. Por isso, recomenda-se a contínua avaliação das novas práticas, com a finalidade de obter resultados cada vez mais avançados que possam reciclar totalmente tais produtos, permitindo sua adoção na produção industrial, evitando o desperdício de matéria-prima e minimizando as emissões deletérias dessa cadeia produtiva.

O Brasil, em função de sua localização geográfica, é muito promissor para o desenvolvimento e a geração de energia solar, podendo atingir 13% de toda a energia produzida no ano de 2050. Diante desta possibilidade alvissareira, discutiu-se medidas mitigadoras objetivando as atitudes que devem ser postas em práticas para evitar novos problemas.

Dentre essas medidas, a literatura revisada permitiu concluir que o Brasil, onde a energia solar ainda é incipiente, carece de legislação adequada para classificar os resíduos fotovoltaicos e prever o seu gerenciamento, peças fundamentais para a preservação ambiental e para a destinação adequada destes resíduos. Correlacionado com esta mesma preocupação, sugeriu-se a possibilidade de adoção de um sistema de logística reversa específico para os módulos fotovoltaicos.

Foi possível concluir que a eficácia do sistema de reciclagem depende do correto manuseio dos produtos com a definição das

responsabilidades de produtores e consumidores quanto ao gerenciamento e a destinação a ser dada aos mesmos.

Finalmente, o Brasil, por ser ainda incipiente no ramo fotovoltaico deve se antecipar aos problemas futuros com a criação de uma lei moderna que defina a correta classificação dos módulos como resíduos REEE e perigosos, que contemple um Plano Diretor de desenvolvimento fotovoltaico, prevendo incentivos à produção energética e à reciclagem, além de estabelecer as regras para a implantação do sistema de logística reversa.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos**. Brasília, 2012.
- ABINEE. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Belo Horizonte: Abinee, 2012.
- ARAÚJO, M. G., MAGRINI, A., MAHLER, C. F., BILITEWSKI, B. **A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil**. Waste Management 32 , 335-342. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- Atlas Solarimétrico do Brasil: **banco de dados solarimétrico**/ coordenador Chiguero Tiba et. al.: Ed. Universitária da UFPE. Recife 2000. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)> Acesso em: 14 de maio de 2016.
- BAGNALL, D., BORELAND, M. **Photovoltaic Technologies**. Energy Policy. Issue 12, v.36, p.4390-4396, 2008.
- BAZIN, F.; BILLARD, Y.; LACROIX, O. **Recycling of Photovoltaic End-of-Life Panels** – International Overview. RECORD, Julho 2012.
- BENEFIELD, L. E. **Implementing evidence-based practice in home care**. Home Healthcare Nurse, Baltimore, v. 21, n. 12, p. 804-811, Dec. 2003.
- BOTELHO, L.L.R.; CUNHA, C.C.de A.; MACEDO, M. **O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais**. Gestão e Sociedade. Belo Horizonte. v5, n11, p. 121-136. Maio/Agosto 2011 .

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 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..**Política Nacional de Resíduos Sólidos**.

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

BROOME, M. E. **Integrative literature reviews for the development of concepts**. In: RODGERS, B. L.; CASTRO, A. A. Revisão sistemática e meta-análise. 2006. Disponível em: <[www.metodologia.org/meta1.PDF](http://www.metodologia.org/meta1.PDF)> . Acesso em: 21 out. 2016.

BROUWER, Karen Ann; GUPTA, Chaya; HONDA, Shelton. **Methods and Concerns for Disposal of Photovoltaic Solar Panels**. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Science In Engineering, The Faculty Of The Department Of General Engineering, San Jose State University, San Jose, 2011. Disponível em: <[http://generalengineering.sjsu.edu/docs/pdf/mse\\_prj\\_rpts/fall2011/METHODS%20AND%20CONCERNS%20FOR%20DISPOSAL%20OF%20PHOTOVOLTAICS.pdf](http://generalengineering.sjsu.edu/docs/pdf/mse_prj_rpts/fall2011/METHODS%20AND%20CONCERNS%20FOR%20DISPOSAL%20OF%20PHOTOVOLTAICS.pdf)>. Acesso em: 02 out. 2016.

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.

CHIVELET, N. M. **Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura**: Bookman. Porto Alegre, 2010.

COMISSÃO EUROPEIA. Mandate to the European Standardisation Organisations for Standardisation in the Field of Waste Electrical and Electronic Equipment (Directive 2012/19/ EU) (M/518 EN), European Commission, Brussels, Belgium, 2013.

CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Esólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/bipv.php>>. Acesso em: 12 de setembro de 2016.



DGS. **Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers:** Earthscan. London, 2008.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos.**2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

EIA. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2016.** 2016. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/electricity.cfm>>. Acesso em: 23 set. 2016.

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

FLEISCHMANN, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J., DEKKER, R., VAN DER LAAN, R., VAN NUNEN, J., VAN WASSENHOVE, L. **Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review – European Journal of Operational Research** 103, 1-17; 1997.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotérmica e fotovoltaica.**: Ed universitária da UFPE. Recife, 1995.

GALVÃO, C. M.; SAWADA, N. O.; TREVIZAN, M. A. **Revisão sistemática: recurso que proporciona a incorporação das evidências na prática da enfermagem.** Revista Latino-Americana de Enfermagem, 2010.

GIACCHETTA, G., LEPORINI, M., MARCHETTI, B. **Evaluation of the Environmental Benefits of New High Value Process for the Management of the End of Life of Thin Film Photovoltaic Modules.** Journal of Cleaner Production, 51, 214-224, 2013.

GORE, A. **Nossa escolha: um plano para solucionar a crise climática. Our choice: a plan to solve the climate crisis.** Barueri, SP: Manole, 2010.

IEA. International Energy Agency. **Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy.** France, 2014.

IEEE - INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. 2014. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/wpcontent/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em: 15 de setembro de 2016.

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.

KIDDEE, P., NAIDU, R., WONG, M. H. **Electronic waste management approaches: An overview**. Waste Management 33, 1237-1250. 2010.

LACERDA, Leonardo. **Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Sargars Competência Logística. Disponível em: <[http://www.sargas.com.br/site/artigos\\_pdf/artigo\\_logistica\\_reversa\\_leonardo\\_lacerda.pdf](http://www.sargas.com.br/site/artigos_pdf/artigo_logistica_reversa_leonardo_lacerda.pdf)> Acesso em: 11 de novembro de 2016.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C. M. **Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem**. Texto Contexto Enfermagem, Florianópolis, v. 17, n. 4, p. 758-764, out./dez. 2008.

MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2016: ano base 2015. Relatório Final**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

MME. Ministério de Minas e Energia. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço 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.

PARLAMENTO E CONSELHO EUROPEU. Directive WEEE 2002/96/EC, de 27 de janeiro de 2003. Bruxelas, 2003.

PARLAMENTO E CONSELHO EUROPEU. Directive WEEE 2012/19/EU, de 04 de julho de 2012. Bruxelas, 2012.

PERN, JOHN. **Module Encapsulation Materials, Processing and Testing**. APP International PC Reliability Workshop. Shangai, China: 2008.

POLIT, D. F.; BECK, C. T. **Using research in evidence-based nursing practice**. In: POLIT, D. F.; BECK, C. T. (Ed.). Essentials of nursing research. Methods, appraisal and utilization. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006.

REIS, L. B. D.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável** Ed. Manole. 2005. Ribeirão Preto, v. 12, n. 3, p. 549-556.

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. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. 2013. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

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.

SOLAR POWER EUROPE. **Global Market Outlook for Photovoltaics until 2017.** Belgium, 2015.

SOLAR, Portal. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico.** Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

SOUZA, M.T.; SILVA, M. Dias da; CARVALHO, R.I de. **Revisão integrativa: o que é e como fazer.** Einstein, v. 8, p. 102-106, 2010.

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.

TYAGI, V., et al. **Progress in solar PV technology:** Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 443-461, 2013.

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

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Erica, 2012.

WILDMER, R., OSWALD-KRAPF, H., SINHA-KHETRIWAL D., SCHNELLMANN M., BO'NI H. **Global perspectives on e-waste.** Environmental Impact Assessment Review 25 (2005) 436-458.

WU, L., TIAN, W., JIANG, X. **Silicon-based solar cell system with a hybrid PV module.** *Solar Energy Materials & Solar Cells* 87 (2005) 637-645.