



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

REBECA ARAÚJO SOARES

**LOGÍSTICA REVERSA DOS MÓDULOS SOLARES
FOTOVOLTÁICOS DE SILÍCIO CRISTALINO NO BRASIL**

FORTALEZA

2017

REBECA ARAÚJO SOARES

LOGÍSTICA REVERSA DOS MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTÁICOS DE
SILÍCIO CRISTALINO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S656l Soares, Rebeca Araújo.
Logística reversa dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil. / Rebeca Araújo
Soares. – 2017.
67 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.
1. Energia solar fotovoltaica. 2. Módulos solares de silício cristalino. 3. Logística reversa. 4. Reciclagem
de módulos. I. Título.

CDD 621.042

REBECA ARAÚJO SOARES

LOGÍSTICA REVERSA DOS MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTÁICOS DE
SILÍCIO CRISTALINO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Felipe Alves Albuquerque Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Paulo Herbert França Maia Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, pelo exemplo de perseverança e disciplina, ao meu pai, pelo apoio e por acreditar sempre em mim, à minha irmã, pela força que me deu quando mais precisei e aos meus familiares, pela paciência e compreensão, especialmente nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

À Deus e Nossa Senhora de Fátima, que sempre foram conforto e morada para os momentos mais felizes e mais difíceis.

À minha família, que sempre me apoiou e incentivou a buscar a educação. Espero poder retribuir sempre esse apoio e poder passar a frente todos os valores que me ensinaram e que me ajudaram a ser uma pessoa mais forte e melhor sempre.

Aos meus amigos, que mesmo com minha frequente ausência, com a distância e com o tempo, permaneceram fiéis e sempre torceram pelas minhas vitórias.

À equipe Braselco, pela força, pela torcida e pelas experiências incríveis que tive desde o primeiro dia de trabalho.

Aos professores Nivaldo Freire, Felipe Albuquerque e Paulo Herbert Maia pela atenção e esforço para tornar possível a conclusão e apresentação desse trabalho.

À Universidade Federal do Ceará que, ao longo desses anos, proporcionou-me a oportunidade de adquirir experiências que levarei por toda minha vida.

“Ao olhar p’ras artimanhas no Mundo, o homem e as máquinas que ele faz, com as lentes do meu ‘neurar’ fecundo, percebo a humanidade mais e mais.” (Denis Moura de Lima).

RESUMO

O mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo tem crescido exponencialmente nos últimos anos, o que representa um maior número de módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino produzidos e instalados. As preocupações acerca da minimização de impactos dos componentes na natureza são exploradas nesse trabalho com finalidade de propor medidas principalmente voltadas para a logística reversa e a reciclagem. A principal motivação é que esses equipamentos, por ainda serem relativamente novos, não têm despertado tanto interesse e preocupação quanto à destinação final. Ao longo deste trabalho, foram apresentados conceitos sobre a energia solar fotovoltaica e sobre os componentes que fazem parte dos módulos que estão sendo mais usuais no mundo e que vêm sendo instalados no Brasil. Foram apresentados também os impactos ambientais causados pela fabricação dos módulos e pela implantação das usinas e são comentados os possíveis riscos de danos ambientais relacionados à negligência de destinação desses equipamentos ao fim de suas operações. Um panorama atual da energia produzida pela fonte no Brasil e no resto do mundo é mostrado, bem como as perspectivas de crescimento associada à geração de resíduos. Modelos aplicados na União Europeia para o gerenciamento dos resíduos produzidos pelos módulos obsoletos foram apresentados, bem como a legislação atual brasileira e as deficiências que esta ainda apresenta para lidar efetivamente com este setor. Por fim, foram apresentados conceitos sobre a logística reversa e seus benefícios, assim como as oportunidades de criação de uma nova cadeia de valor utilizando os módulos desativados como insumos para indústrias de reciclagem. Após a separação e a reciclagem, esses equipamentos podem ser destinados à fabricação de novos módulos, ou podem seguir para outros mercados que façam o reuso, reduzindo, portanto, os impactos ambientais que seriam gerados pelo descarte dos mesmos. Foram apresentadas alternativas para implantação de centros de coletas e de reciclagem em locais do Brasil em que já se têm projetos outorgados pela Agência Brasileira de Energia Elétrica, para que as distâncias sejam reduzidas e o para mercado de reciclagem se tornar economicamente viável. Também foram apontadas mudanças que precisam ser feitas na legislação atual para que se possibilite a implementação desse mercado.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, módulos solares de silício cristalino, logística reversa, reciclagem de módulos.

ABSTRACT

The market for photovoltaic solar energy in Brazil and in the world has grown exponentially in recent years, which represents a greater number of photovoltaic solar modules of crystalline silicon produced and installed. Concerns about minimizing the impacts of the components in nature are explored in this work with the purpose of proposing measures mainly focused on reverse logistics and recycling. The main motivation is that those equipment, because they are relatively new, have not aroused as much interest and concern as the final destination. Throughout this work, it is presented concepts about photovoltaic solar energy and about the components that are part of the modules that are being more used in the world and that have been installed in Brazil. The environmental impacts caused by the manufacture of the modules and the implantation of the plants were also presented and the possible risks of environmental damage related to the negligence of destination of these equipments at the end of their operations are discussed. A current picture of the energy produced by the source in Brazil and the rest of the world is shown, as well as the perspectives of growth associated with the generation of waste. Models applied in the European Union for the management of waste produced by the obsolete modules were presented, as well as the current Brazilian legislation and the deficiencies that the country still presents to effectively deal with this sector. Finally, concepts were presented about reverse logistics and its benefits, as well as the opportunities to create a new value chain using the deactivated modules as inputs for the recycling industries. After separation and recycling, those equipment can be used to manufacture new modules, or they can go to other reuse markets, thus reducing the environmental impacts that would be generated by their disposal. Alternatives have been presented for the implantation of collection and recycling centers in places in Brazil, where projects already granted by the Brazilian Electric Energy Agency are already in place, so that distances are reduced and the recycling market becomes economically viable. It was also pointed out changes that need to be made in the current legislation in order to allow the implementation of this market.

Keywords: Photovoltaic solar energy, crystalline silicon solar modules, reverse logistics, module recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura simplificada de banda de energia de semicondutores.....	17
Figura 2 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	19
Figura 3 - Curva I x V	22
Figura 4 - Comportamento da Temperatura do Módulo CS6X-310P	24
Figura 5 - Módulos de Silício Cristalino - Monocristalino (esquerda) e Policristalino (direita)	26
Figura 6 - Decréscimo de rendimento do módulo CS6X-300.....	27
Figura 7 - Capacidade Instalada Global de Energia Solar Fotovoltaica (GW)	39
Figura 8 - Capacidade instalada de solar fotovoltaica de 2015	39
Figura 9 – Potência outorgada em operação por estado (kW).....	41
Figura 10 - Resultados estimados cumulativos de resíduos gerados no fim da vida dos módulos no Brasil (em toneladas)	42
Figura 11 - Potencial de criação de valor no fim de vida dos módulos.....	43
Figura 12 - Curvas de Weibull	46
Figura 13 - Fluxo de canais reversos	56
Figura 14 - Fluxograma dos estágios do ciclo de vida dos módulos.....	57
Figura 15 - Usinas fotovoltaicas outorgadas no Brasil.....	58
Figura 16 – Potência instalada por região brasileira (kW)	60
Figura 17 – Possibilidades para implantações de centros de coletas e reciclagem para projetos de geração distribuída.....	61
Figura 18 - Usinas fotovoltaicas de geração centralizada	62
Figura 19 - Fluxo de opções de reciclagem de módulos	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Materiais requeridos durante a produção de módulos solares de silício policristalino	21
Quadro 2 - Emissões da produção de módulo fotovoltaico de silício policristalino	29
Quadro 3 - Usinas Solares Fotovoltaicas no Brasil	41
Quadro 4 - Hipóteses para levantamento de projeções das perdas de módulos	45
Quadro 5 - Evolução histórica das principais atividades para o desenvolvimento sustentável do Brasil.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	15
1.2 . Objetivos específicos:	15
1.3 Justificativa.....	15
2. CONCEITOS INICIAIS	16
2.1 Efeito Fotovoltaico.....	16
2.2 Fabricação de Células de Silício Cristalino.....	19
2.3 Comportamento Elétrico de Células Solares Fotovoltaicas	22
2.4 Módulos de Silício Cristalino.....	25
3. PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS	27
3.1 Fabricação	28
3.2 Implantação	30
3.3 Fim da Operação	37
4. PANORAMA DO SETOR	38
4.1 Mundo	38
4.2 Brasil	40
4.3 Resíduos gerados.....	43
5. PROGRAMAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS	46
5.1 Modelo europeu.....	46
5.2 Legislação brasileira.....	49
6. LOGÍSTICA REVERSA	53
7. CONCLUSÃO	65
8. REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica, através das tecnologias de conversão da energia solar fotovoltaica, vem crescendo no mundo há anos. Todavia, no Brasil, o setor ganhou destaque com a aprovação da resolução 482 da Agência Brasileira de Energia Elétrica (ANEEL), em 2012, e passou a atrair um mercado antes minimamente explorado.

A atratividade do setor de energia solar fotovoltaica passa por inúmeros benefícios, desde a sua inesgotável fonte aos mínimos impactos ambientais causados, quando comparados às demais fontes convencionais de geração de energia elétrica.

Apesar dos benefícios da fonte, não é possível afirmar que não há impactos gerados pelo ciclo de vida dos módulos solares. Os danos ambientais decorrentes da fabricação, da implantação e da operação dessas usinas vêm sendo apontados por diversos estudos. Todavia, apesar dos indicativos da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, sigla em inglês), no relatório *END-OF-LIFE management: Solar Photovoltaic Panels* (Gestão de fim de vida: Painéis Solares Fotovoltaicos) publicado em 2016, a preocupação com a destinação dos equipamentos que compõem as plantas solares fotovoltaicas ainda está longe do necessário para lidar com a quantidade que ficará obsoleta ou inoperante nos próximos trinta anos.

Na vanguarda, como costuma estar, o continente europeu, que há anos percebe a expansão do setor, vem mostrando que a preocupação ambiental, que também levou países como Alemanha, Espanha e Portugal a investirem tanto na implantação desses sistemas, não parou na operação das usinas. Desde 2012, os módulos fotovoltaicos estão incluídos na Diretiva sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) que regula o tratamento de produtos em fim de vida, exigindo que fabricantes cumpram as obrigações de gestão de resíduos, como cita o relatório de IRENA.

As medidas foram adotadas para que os efeitos nocivos da geração de resíduos pudessem ser prevenidos, para incentivar gestões sustentáveis e para estabelecer quadros jurídicos pertinentes.

O Brasil possui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) desde 2010. A lei federal 12.305 institui responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, desde fabricantes até cidadãos e titulares de serviço de manejo dos resíduos sólidos urbanos na logística reversa e pós-consumo. Todavia, dado, principalmente, ao fato de o setor de energia solar fotovoltaica estar há menos de dez anos em evidência no cenário nacional, percebe-se

uma ausência de discussões acerca das medidas que deverão ser tomadas no fim da vida desses equipamentos.

Os impactos ambientais gerados pela operação desses sistemas, de fato, são inexpressivos quando comparados aos impactos que outras fontes causam, como usinas termelétricas e hidroelétricas. Entretanto, usinas fotovoltaicas deixarão de funcionar em alguns anos, ou deixarão de operar com rendimentos viáveis, precisando, portanto, de substituição de equipamentos. O que se questiona é o que será feito desses equipamentos, quem deverá assumir as responsabilidades e de que forma poderia ser feita a logística reversa e a reciclagem, para que os danos ambientais que venham a ser gerados por esses materiais possam ser mitigados.

Classicamente, a principal preocupação da indústria está voltada aos aspectos econômicos. Produzir em quantidades ideais para atender às demandas dos mercados, transportar e entregar aos consumidores produtos a custos otimizados, tem sido o grande desafio de profissionais de logística e de cadeia de suprimentos. Entretanto, em vista às crescentes preocupações com meio ambiente e às legislações ambientais, muitas empresas, ao redor do mundo, têm enfrentado o desafio de elaborar planos para que os canais reversos possam contribuir com uma diminuição na poluição causada pelo despejo indevido de seus produtos.

Este trabalho está dividido em seis partes, na seção 2 são apresentados os conceitos iniciais a respeito do efeito fotovoltaico, dos processos de fabricação das células de silício cristalino, do comportamento elétrico das células solares e por fim apresentados módulos produzidos com essas células. O objetivo desta seção é introduzir ao leitor os conhecimentos básicos acerca da energia solar fotovoltaica e das aplicações e do funcionamento dos módulos utilizados como objeto de estudo deste trabalho.

Em seguida, foram tratados os principais impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino. Entende-se que julgar a fonte como limpa sem que haja uma preocupação quanto ao ciclo de vida desses equipamentos é negligenciar que, mesmo que o setor ainda represente uma porcentagem mínima frente às outras fontes, seu crescimento aponta que grandes desafios quanto à atenção ambiental vão surgir nos próximos trinta anos, como aponta o relatório da IRENA, de 2016.

A seção 4 tratou-se do panorama mundial e nacional do mercado, trazendo a situação atual de capacidade instalada e as projeções futuras. Nesta seção, alguns dados

quanto à geração de módulos a serem descartados, no fim de suas vidas, e aos desafios e às oportunidades que surgirão nos próximos anos, foram discutidos.

A seção seguinte apresentou o programa de resíduos adotado na União Europeia para o setor de energia solar, bem como a legislação brasileira atual, comentando principalmente sobre a falta de discussão atual sobre políticas exclusivas para adoção de medidas acerca da destinação final dos módulos instalados no país.

Apesar da escassez de literatura quanto à logística reversa nesse setor e, devido à recente expressividade da energia solar fotovoltaica, na seção 6 foram apresentados conceitos sobre os processos reversos de materiais, bem como discutidos os principais desafios para o setor de energia solar fotovoltaica. Foi proposto um modelo para solucionar esta problemática, tendo em vista que mesmo que o assunto ainda não esteja sendo tratado com profundidade por autoridades, como necessita, a universidade está atenta e interessada em prover soluções que possam contribuir com o desenvolvimento sustentável de toda a cadeia.

1.1 Objetivo geral

Promover uma discussão sobre os possíveis impactos causados ao meio ambiente quando os módulos solares atuais estiverem inoperantes ou obsoletos.

1.2 . Objetivos específicos:

- Apresentar legislações específicas relacionadas ao reuso dos módulos fotovoltaicos em outros países;
- Sugerir gestão desses resíduos através da logística reversa de aproveitamento dos módulos fotovoltaicos;
- Aplicar medidas alternativas como sugestão de reuso dos módulos fotovoltaicos.

1.3 Justificativa

O mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil tem crescido exponencialmente nos últimos anos, desde a aprovação da resolução 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que regulamenta a conexão de sistemas descentralizados à rede elétrica. Essa expansão significa uma crescente quantidade de módulos instalados e um

aumento da atratividade do setor em todo o país. Embora tenham uma vida útil estimada de 25 anos, esses módulos, quando obsoletos, precisarão ser substituídos, e aqueles que já não produzem o suficiente precisarão ter uma destinação adequada, do contrário podem trazer grandes prejuízos ambientais. Sob a percepção de que medidas de prevenção precisam ser tomadas para que a sustentabilidade da fonte seja mantida, neste trabalho pretende-se apresentar medidas alternativas que possam ser aplicadas para a coleta dos equipamentos em desuso e para sua destinação.

2. CONCEITOS INICIAIS

2.1 Efeito Fotovoltaico

A obtenção de energia através da conversão direta da luz em eletricidade é chamada de energia solar fotovoltaica.

Pinho (2014) aponta o efeito fotovoltaico como tendo sido observado, pela primeira vez, pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839. Esta “descoberta” permitiu o primeiro passo em direção à utilização da energia emitida pelo sol para a produção de energia elétrica. De acordo com o físico, uma célula eletroquímica seria capaz de apresentar diferença de potencial em seus terminais se esta for exposta à luz.

Apesar da descoberta do físico francês ter ocorrido ainda no século XIX, foi apenas na década de 1950, quase 110 anos depois, que começaram a ser produzidas as primeiras células fotovoltaicas que se baseavam em avanços tecnológicos de dispositivos semicondutores.

Desde então, inúmeras formas de fabricação de célula solares fotovoltaicas têm sido desenvolvidas, desde as mais usuais e predominantes no mercado mundial, tais como as células de silício monocristalino e policristalino, até células multijunção de alta eficiência como é o caso das que se baseiam em corantes DSSC (*Dye Sensitized Solar Cells*, em português, Células Solares Sensibilizadas com Corantes).

Pinho (2014) fala que os materiais semicondutores se caracterizam pela presença de uma banda de valência completamente preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons na temperatura do zero absoluto (0 K). Comportando-se como um isolante a 0 K.

Na natureza é possível encontrar inúmeros elementos semicondutores, tais como o Carbono (C), o Silício (Si), o Germânio (Ge), o Arsênio (As), o Fósforo (P), o Selênio (Se) e o Telúrio (Te).

Quando duas bandas de energias permitidas de materiais semicondutores são separadas, um *gap* chamado de banda proibida é formado, e este pode atingir no máximo 3 eV (elétron-volt).

Devido à existência de bandas de energia, uma característica importante dos semicondutores é o aumento da condutividade com a temperatura, ocasionado pela excitação térmica dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando assim, lacunas na banda de valência, constituídas por portadores de carga positiva que possuem uma mobilidade de cerca de um terço da dos elétrons da banda de condução. Essas bandas podem ser observadas na figura 1.

Figura 1 – Estrutura simplificada de banda de energia de semicondutores



Fonte: Autora

Desse modo, em temperaturas superiores ao zero absoluto, sempre haverá no semicondutor uma quantidade de elétrons que ocupam a banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência, chamados de portadores intrínsecos.

Os elétrons vão preenchendo os níveis de energia vagos a partir do fundo da banda de condução para cima, enquanto as lacunas vão ocupando os níveis a partir do topo da banda de valência para baixo.

Quando a absorção de fótons acontece e a energia é superior a do *gap*, ocorre uma dissipação da energia em excesso como calor no material e este efeito é chamado de termalização.

Os elétrons e as lacunas foto gerados podem se mover dentro do material e aumentar sua condutividade elétrica, formando assim, o efeito fotocondutivo.

Todavia, para que se consiga aproveitar uma corrente e uma tensão necessárias para aplicar a um campo elétrico, com a finalidade de separar os portadores, é preciso realizar uma junção *pn*.

Apresentada pelo físico americano William Shockley na década de 50, a junção *pn* pode ser construída introduzindo de forma controlada impurezas no semiconductor, ou em outras palavras, dopando o material. Este método consiste em introduzir pequenas quantidades de outros elementos, chamados impurezas ou dopantes, que mudam drasticamente as propriedades elétricas de um material intrínseco, ou seja, que não possui dopagem (tipo i).

Elementos como o Fósforo (P), o Arsênio (As) e o Antimônio (Sb) podem ser usados como dopantes tipo *n*, também chamados de impurezas doadoras de elétrons. Semicondutores tipo *n* se localizam acima do ponto médio da banda proibida, próximo à banda de condução.

Elementos como o Boro (B), o Alumínio (Al), o Gálio (Ga) e o Índio (In) podem ser usados como dopantes tipo *p*, também chamados de impurezas aceitadoras de elétrons. Semicondutores tipo *p* se localizam abaixo do ponto médio da banda proibida, próximo à banda de condução.

Quando se introduz em uma metade de uma lâmina de silício, por exemplo, átomos de boro, e, na outra, átomos de fósforo, forma-se uma junção *pn*. A diferença de potencial (*ddp*) entre as regiões *p* e *n* é resultado das diferenças no Nível de Fermi¹ nos dois materiais, que ao entrarem em contato, uma situação de equilíbrio é alcançada quando os níveis de Fermi se igualam, devido ao fluxo inicial de portadores e ao estabelecimento de um campo elétrico e de uma *ddp*, que é a responsável por impelir a corrente foto gerada.

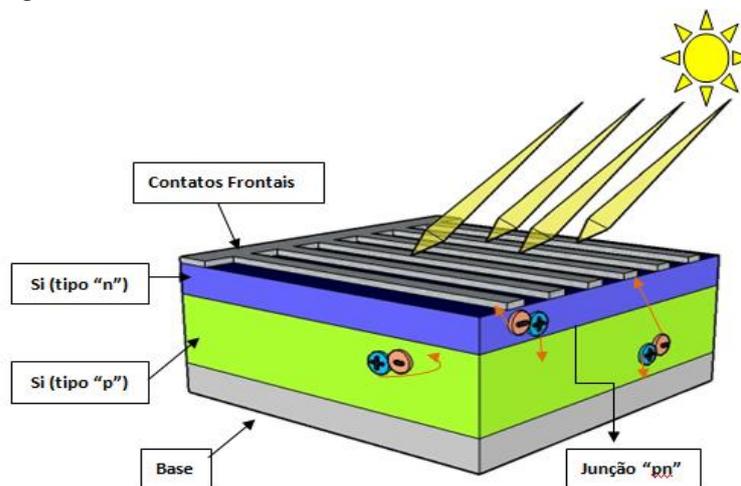
A separação de portadores de carga pela junção *pn* dá origem ao efeito fotovoltaico, que na verdade, ocorre em qualquer diodo semiconductor quando exposto à

¹ Nível de Fermi é o nível médio de energia dos portadores no material e, em semicondutores intrínsecos, situa-se no meio da banda proibida.

radiação. O que diferencia as células fotovoltaicas, portanto, é o fato de serem diodos de grande área que foram otimizados para melhorar o aproveitamento fotovoltaico.

Conectando contatos elétricos frontais na região n e traseiros na região p , permite-se a circulação dos elétrons. A figura 2 permite a compreensão do efeito em uma célula fotovoltaica.

Figura 2 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: Autora

Alguns fatores limitantes da eficiência de conversão destas células fotovoltaicas são:

- a) reflexão na superfície frontal;
- b) sombra ocasionada pela malha metálica frontal;
- c) absorção nula ou menor de fótons de energia do *gap*;
- d) fugas de corrente elétrica.

2.2 Fabricação de Células de Silício Cristalino

Como mencionado, o efeito fotovoltaico, observado pelo físico Becquerel, permitiu que a tecnologia de obtenção de energia elétrica através da conversão da energia solar fosse desenvolvida e que as primeiras células pudessem ser produzidas. Em razão de fatores como certa facilidade de suprimento da matéria prima, de produção e de eficiência, a principal matéria-prima utilizada para a fabricação de células solares fotovoltaicas,

atualmente, é o silício cristalino obtido da redução da sílica. Além disso, a produção industrial dessas células fez com que esse mercado conseguisse ganhar competitividade, em vista da redução dos custos de produção.

Para a produção de Sílica (SiO_2) é preciso minerar quartzo e areia e reduzir a sílica ao silício. A mineração desses já é uma tecnologia conhecida e muito usada, não apenas para a produção de células solares fotovoltaicas.

A redução da sílica pode ser feita com carbono seguindo a reação:



O carbono utilizado na redução da sílica vem do carvão, de coques, de carvão de baixa cinza e de restos de madeira. Essa primeira redução da sílica produz o silício de grau metalúrgico. Como esse silício possui ainda muitas impurezas para ser aplicado em semicondutores ou em células solares, através do processo Siemens ou de similares, obtém-se um silício de alta pureza.

O reator da Siemens é considerado caro, principalmente em razão da grande quantidade de energia necessária e por isso, processos como o do reator de leito fluidizado e a deposição de vapor a líquido também têm sido usados para obtenção do silício de alta pureza.

Após a obtenção do silício grau solar, existem dois modos principais para a fabricação dos *waffers* (bolachas):

- a) monocristalina: o silício é formado em uma estrutura cristalina única, onde um lingote é formado (processo *Czochralsky*), em forma cilíndrica e depois é cortado em bolachas finas, com serras diamantadas de alta precisão.
- b) policristalina: o silício obtido do processo Siemens é transformado em blocos de silício policristalino, colocado em cadinhos de cerâmica e é liquefeito em um reator. Após a fusão e o resfriamento, o bloco é removido do cadinho e cortado em lâminas.

A maior quantidade de material utilizada para a produção dos módulos é composta por vidro endurecido quimicamente, com cerca de 7,3 kg por módulo, por alumínio e por elastômero de polissulfureto, que são usados na moldura e somam 2 kg por módulo. Esses valores foram estimados com base na evolução tecnológica de produção dos módulos, avaliados pelo autor supracitado. Esses materiais que dominam, apresentam uma relativa

vantagem quanto às possibilidades de desmontagem e reciclagem dos materiais, diminuindo os impactos ambientais do ciclo de vida dos módulos.

Phylipsen (1995), em seu trabalho sobre a avaliação ambiental do ciclo de vida dos módulos de células solares policristalinas, apresenta uma tabela, que foi modificada e é apresentada no quadro 1, a respeito dos possíveis materiais a serem utilizados para a produção dos módulos.

Quadro 1 - Materiais requeridos durante a produção de módulos solares de silício policristalino

ETAPA DO PROCESSO	MATERIAL		
Mineração e Refino	Quartzo		
Redução de SiO₂ para Si	Carvão	Restos de Madeira	Coque
Produção de Si de Alta Pureza	Si grau metalúrgico	Sílica	Al ₂ O ₃
	SiCl ₄	Carbono	CaCO ₃
	HCl (20%)	Na ₂ CO ₃	
Moldagem / Corte / Bolacha	Si Alta Pureza	Gás Argônio	SiC
	Fluidos de Limpeza	Óleo Mineral	
Serigrafia / Texturização	NaOH	H ₂ SO ₄	
	KOH	HNO ₃	
Formação do Emissor	POCl ₃	CF ₄	HF
Metalização	Pasta de Al	Pasta de Al	Pasta de Ag
Passivação	SiH ₄	N ₂	
	Isopropóxido	NH ₃	
Produção do Módulo	Células	<i>Tedlar</i>	Poliéster
	Cu revestido de Sn	Al	EVA
	Vidro	Adesivo Silício	
Moldura	Elastômero de Polissulfureto	Alumínio	

Fonte: Adaptado de Phylipsen (1995).

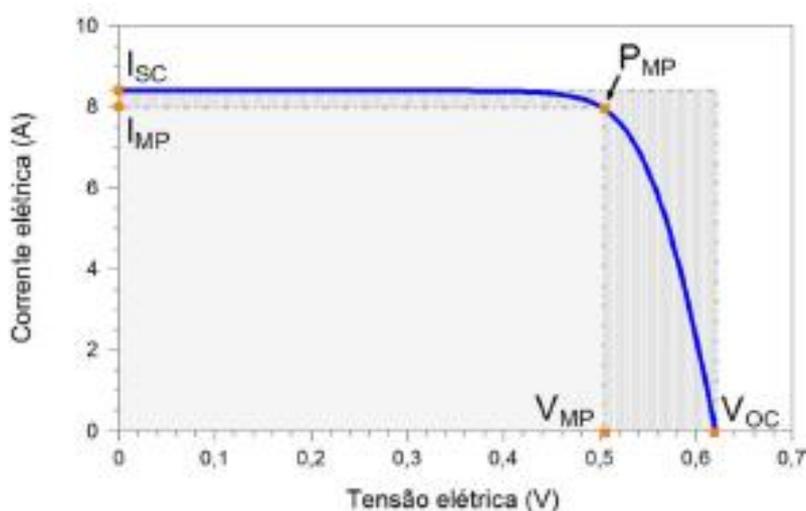
Antes de processar essas “bolachas”, os danos são removidos, segundo Phylipsen (1995), pela gravação com hidróxido de sódio (NaOH, com 33% de água) e em seguida são enxaguadas com água e com ácido sulfúrico concentrado.

2.3 Comportamento Elétrico de Células Solares Fotovoltaicas

Numa célula solar fotovoltaica, a corrente elétrica que circula é uma soma da corrente no semicondutor com a corrente que é gerada pelos fótons que são absorvidos da radiação solar e, em função da tensão nesse dispositivo, forma-se uma curva corrente (I) *versus* tensão (V) como pode ser visto na figura 3, extraída de Pinho (2014) em que o autor demonstra o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica de silício (156 mm x 156 mm), sob condições-padrão de ensaio², onde os parâmetros elétricos principais são destacados. I_{SC} (corrente elétrica de curto-circuito), V_{OC} (tensão de circuito aberto), P_{MP} (potência máxima ou de pico), I_{MP} (corrente no ponto de máxima potência) e V_{MP} (tensão no ponto de máxima potência).

Segundo a NBR 10899, um módulo fotovoltaico é o menor conjunto ambientalmente protegido de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua.

Figura 3 - Curva I x V



Fonte: Pinho (2014).

² Condições-padrão de ensaio (STC, sigla em inglês para *Standard Test Conditions*) são: irradiância de 1000 W/m², espectro solar AM 1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de 25°C.

A tensão de circuito aberto (V_{OC}) é a máxima tensão que a célula consegue produzir quando não há corrente elétrica circulando e pode ser medida conectando um multímetro diretamente aos terminais do módulo.

A corrente de curto circuito (I_{SC}) é a máxima corrente que a célula pode apresentar, sendo verificada apenas quando a tensão em seus terminais é igual à zero.

Outro parâmetro importante a ser citado é o Fator de Forma (FF) do módulo fotovoltaico que mostra o quão próxima da forma de um retângulo ficará a curva I x V da célula, aproximando o fator de forma ao valor ideal de uma unidade. Assim, quanto maior a qualidade das células de um módulo, mais retangular a curva irá se apresentar. Para calcular o FF é preciso conhecer valores supracitados e aplicar à equação 2.

$$FF = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2)$$

Para calcular a eficiência (η) de uma célula é preciso conhecer ainda a área da célula (A) e a irradiância à qual esta foi submetida. De posse dessas informações, pode-se então chegar a eficiência da célula solar fotovoltaica, como é mostrada na equação 3.

$$\eta = \frac{100 \times FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{A \times G} \quad (3)$$

As resistências em série e em paralelo das células fotovoltaicas implicam em importantes influências no comportamento da curva I-V. Resistências em série contribuem para reduzir a I_{sc} , mas não afetam a V_{oc} da célula, enquanto resistências em paralelo irão reduzir a V_{oc} , mas não alteraram a I_{sc} .

Assim como as células, os módulos fotovoltaicos são associados em série e/ou em paralelo, produzindo desta forma, uma única saída de tensão e de corrente.

Quando associados em série, as tensões de cada módulo são somadas, porém a corrente permanece igual. Este fator traz uma característica importante para a montagem dos módulos em uma instalação de projeto fotovoltaico, visto que uma *string*³, com módulos cujas correntes possuam diferenças muito elevadas, é limitada pela menor corrente o que ocasionará

³ *String* é uma associação de módulos fotovoltaicos em série.

perdas de produção. Ao associar em paralelo, a corrente é então somada e as tensões permanecem iguais.

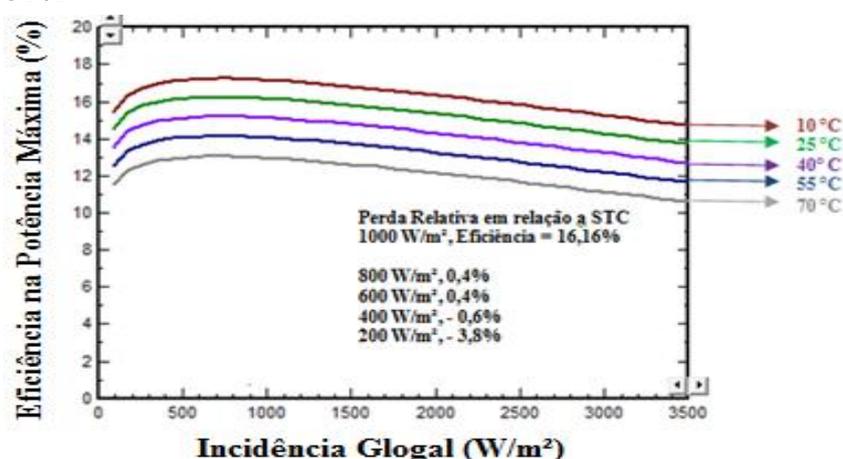
O desempenho das células fotovoltaicas é influenciado principalmente pela irradiação incidente e pela temperatura da célula. A corrente elétrica gerada na célula aumenta linearmente com o aumento da irradiação solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura.

De acordo com Green (2016), células de silício monocristalino possuem eficiência aproximada de 25%, enquanto células de silício policristalino têm eficiência de 20,4%, aproximadamente.

Todavia, o caso supracitado só pode ser observado em laboratório, onde as condições de temperatura podem ser mantidas. Em uma situação real, o aumento da irradiação incidente produz um aumento de temperatura ambiente e ocasiona um aumento na temperatura das células fotovoltaicas. O aumento da temperatura na célula faz com que a tensão desta sofra uma diminuição significativa. Apesar do pequeno aumento na corrente elétrica, a potência de pico sofrerá redução.

Na figura 4 é apresentada a eficiência de um módulo diante do aumento da irradiação global e dos aumentos de temperatura na célula. Cada curva representa o comportamento de um módulo, conforme a temperatura neste varia. Como é possível observar, apesar no aumento da irradiação, o aumento da temperatura reduz a eficiência. Esse comportamento de célula fotovoltaica é resultado da diminuição da tensão devido ao aumento da temperatura no módulo.

Figura 4 - Comportamento da Temperatura do Módulo CS6X-310P



Fonte: (PVSYST®)

Apesar do aumento de corrente, gerado pelo aumento da irradiação, a diminuição da tensão devido às temperaturas mais elevadas, provoca a redução de potência gerada pelo módulo. Pinho (2014) aponta que a célula de silício cristalino sofre uma diminuição aproximada de 0,3% para a tensão de circuito aberto e um aumento de 0,002% na corrente de curto circuito a cada 1 °C.

Segundo Lorenzo (1994), conforme citado por Beltrão (2008, p. 47), é possível obter uma relação entre a tensão de circuito aberto para uma condição de operação numa temperatura específica $V_{OC(G_i)}$, tendo posse dos valores da tensão de circuito aberto para condições padrão específica (STC) de operação $V_{OC(STC)}$ e a temperatura do módulo T_M (°C).

$$V_{OC(G_i)} = V_{OC(STC)} - 0,0023 \cdot (T_M - 25) \quad (4)$$

Tamizhmani(2002), por sua vez, relaciona a temperatura do módulo, com a temperatura ambiente T_A (°C), a irradiância local G_i (W/m²) e a velocidade do vento W_s (m/s).

$$T_M = 0,943 \cdot T_A + 0,028 \cdot G_i - 1,528 \cdot W_s + 4,3 \quad (5)$$

Com as equações 4 e 5, pode-se entender o comportamento dos módulos, e portanto, das células quanto aos efeitos do aumento da temperatura e, finalmente, perceber as razões pelas quais há uma redução na eficiência dessas.

A principal relevância das equações apresentadas, em particular as que observam os efeitos da temperatura na célula com as variações da temperatura ambiente, está na observância de que devido à diminuição da eficiência de geração, especialmente em projetos no Nordeste brasileiro, muitos projetistas optam por aumentar a quantidade de módulos em suas usinas, para aumentar fatores de capacidade, e assim, vê-se que há um grande potencial de crescimento de módulos no Brasil, não só por uma questão de crescimento de mercado, mas em razão também dos tipos de projetos que vêm sendo desenvolvidos.

2.4 Módulos de Silício Cristalino

Há diversas tecnologias disponíveis atualmente para o aproveitamento da energia solar com o objetivo de produzir energia elétrica. Entretanto, foram os módulos de silício

crystalino que ganharam a atenção do mercado e conseguiram expandir o setor. Uma das razões para tal crescimento é a menor complexidade de fabricação das células de silício, quando comparado a outros processos que produzem células com rendimentos equivalentes. Na figura 4, pode-se observar os dois modelos mais comuns no mercado de energia solar fotovoltaica, atualmente.

Segundo Pinho (2014), os módulos podem ser constituídos de conjuntos de 36 a 216 células fotovoltaicas que podem ser associadas em série e/ou em paralelo, dependendo dos padrões elétricos para os quais esse módulo deva ser aplicado. As células são soldadas em tiras e encapsuladas, para protegê-las de intempéries e dar resistência mecânica ao módulo.

O encapsulamento, ainda segundo o autor supracitado, é feito a partir de um sanduíche feito pelo vidro, pela etil vinila (EVA), pelas células fotovoltaicas, por outra camada de EVA e por um filme posterior isolante, que combina polímeros como fluoreto de polivinila (PVF ou Tedlar[®]) e tereftalato de polietileno (PET).

Na figura 5 é possível observar os modelos mais comuns no mercado mundial de energia solar fotovoltaica, que são os módulos de silício monocristalino e de silício policristalino.

Figura 5 - Módulos de Silício Cristalino - Monocristalino (esquerda) e Policristalino (direita)



Fonte: Canadian Solar

Os módulos de silício cristalino, normalmente, possuem garantias dos fabricantes quanto a defeitos dos materiais e ao transporte, sob as condições normais de instalação e de uso dos mesmos. Normalmente, esses fabricantes entregam uma documentação padrão com instruções que permitem aos instaladores a condução correta desses módulos, garantindo que os mesmos não sofram avarias, já que quaisquer danos causados por agente externos não são cobertos pela garantia da fábrica. As garantias contra defeitos de fabricação variam, porém, comumente, há garantia de rendimento de 25 anos.

A fabricante Canadian Solar, por exemplo, garante que a potência real de saída de seus módulos de silício policristalinos não seja inferior a 97,5% no final do primeiro ano e que não seja inferior à 80,7% do ano 2 ao 25, considerando um decréscimo anual médio de 0,7%, como pode ser observado no gráfico da figura 6, extraído da folha de dados de módulo CS6X-300 da fabricante em questão.

Figura 6 - Decréscimo de rendimento do módulo CS6X-300



Fonte: Canadian Solar

3. PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos ambientais caracterizam-se como quaisquer alterações das características do sistema ambiental, sejam estas físicas, químicas, biológicas, sociais ou econômicas, causadas pelas ações de empreendimentos, as quais possam afetar direta ou indiretamente o comportamento dos parâmetros que compõem os meios físico, biótico e socioeconômico do sistema ambiental na sua área de influência.

Para grandes centrais de geração, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que organiza os leilões de energia exige que, dentre as documentações obrigatórias para habilitação de empreendimentos solares fotovoltaicos, seja apresentada cópia autenticada da

licença ambiental compatível com a etapa do projeto, seja a licença prévia, de instalação, ou de operação. Essa licença deve estar em conformidade com a Lei Federal 6.938/81, com o Decreto Federal 99.274/90 e com as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), assim como deve considerar as legislações estaduais quando houver necessidade.

Para que essas licenças sejam emitidas, faz-se necessário a avaliação dos impactos, a fim de identificar os efeitos gerados ao meio ambiente pelas ações do empreendimento proposto, analisando a relação de causas e de efeitos, podendo, por fim, oferecer parâmetros para a proposição de medidas mitigadoras para garantir a sustentabilidade e a eficiência ambiental dos empreendimentos.

Em empreendimentos cuja potência nominal se limite aos 5 MW (podem ser enquadrados pela resolução 482/2014 da ANEEL) não são requisitadas licenças ambientais, porém, recomenda-se que os responsáveis desses projetos solicitem autorizações de dispensas de licença junto aos órgãos estaduais de meio ambiente. Essa “dispensa”, todavia, diverge opiniões quanto aos impactos que isso pode gerar tendo em vista que mesmo estando enquadrados na legislação que os coloca como geração distribuída, empreendimentos como os do grupo de minigeradores, podem chegar a 5 MW e as áreas de ocupação podem ter impactos significativos.

Apesar da vantagem de baixos impactos durante a operação dos sistemas solares fotovoltaicos, ignorar que os processos de produção, de implantação e de fim de operação causam impactos ao meio ambiente não é prudente.

Por isso, nos itens a seguir, os principais impactos ambientais relativos aos processos de fabricação, de implantação de empreendimentos e do fim da operação desses sistemas são apresentadas, conforme bibliografia consultada para elaboração deste trabalho.

3.1 Fabricação

A produção de células solares fotovoltaicas de silício cristalino leva a emissões de gases como CO₂, SO₂ e NO_x.

Apesar de dar uma ideia generalizada dos impactos gerados, no quadro 2 é apresentada a etapa do processo e os respectivos materiais e suas emissões para a fabricação de módulos de silício policristalinos.

Os materiais que dominam, em termos de rejeitos, são os módulos rejeitados e o elastômero de polissulfureto.

De acordo com Phylipsen (1995), os materiais apresentados no quadro 2 não são suficientes para determinar todos os impactos ambientais do ciclo de vida dessas células solares e por isso o autor se deteve a discutir impactos quanto à diminuição dos recursos, o aquecimento global, a acidificação e os riscos ocupacionais.

Quadro 2 - Emissões da produção de módulo fotovoltaico de silício policristalino

Etapa do Processo/Material	Rejeitos	
Mineração e Refino	Cinza Respirável	X-Sílica
Redução de SiO₂ para Silício Etapa do Processo/Material	CO ₂	H ₂ O
	SiO ₂	SO ₂
Produção de Silício de Alta Pureza	Pó de Si	F contendo cinza
	SiO ₂	Cl contendo cinza
	CaCl ₂	CO ₂
	NaCl	
Moldagem /Corte/Bolacha	Si contaminado	Si (em óleo mineral)
	Si (perdas contaminadas)	SiC
	Gás Argônio	Fluidos de Limpeza
	Óleo Mineral	
Serigrafia/Texturização	Na ₂ SO ₄	NaNO ₃
	KCl	
Formação do Emissor	NaHPO ₃	CaF ₂
	NaOCl	CO ₂
	NaF	
Metalização	Solventes evaporados	CO ₂ e H ₂ O
Passivação/ARC	N ₂	TiOx (na água)
	Isopropanol	TiOx (s)
	Água (g)	
Produção do Módulo	Células rejeitadas	Adesivo Silício
	Perdas de cortes de EVA Módulos rejeitados	Produtos de Reticulação
Moldura	Elastômero de Polissulfureto	

Fonte: Phylipsen (1995)

Essa insuficiência de dados é explicada pelo fato de que esses impactos são cumulativos e segmentados por categorias, o que dificultaria a quantificação dos mesmos, especialmente porque há dados no quadro 2 em que não foram definidos os fatores de pesagem. Assim, o autor avaliou essas emissões apenas em caráter qualitativo e comparativo à outras fontes, como as usinas elétricas a carvão.

O autor supracitado aponta que substâncias tóxicas aos seres humanos e ao meio ambiente são liberadas no ciclo de vida dos módulos, como fluoreto, nitrato, dióxido de enxofre, além daquelas que influenciam no aquecimento global, como o dióxido de carbono e que prejudicam a camada de ozônio, como o isopropanol e os solventes.

3.2 Implantação

Os impactos ambientais decorrentes da implantação de usinas solares fotovoltaicas vão desde alterações e degradações das paisagens locais a alterações morfológicas e instabilidades temporárias da superfície.

As áreas de influência dos empreendimentos são definidas em função do prognóstico das suas interferências ambientais, bem como dos tipos de impactos ambientais gerados sobre os componentes abióticos, bióticos e antrópicos do meio ambiente. Nesse contexto as áreas de influência dos empreendimentos compreendem as áreas de influência direta e indireta.

A área de influência direta (AID) fica no raio de 500 metros definido em função da área do entorno mais próximo que poderá sofrer impactos diretos na implantação do empreendimento. Essa área será caracterizada em função da importância do conhecimento dos aspectos naturais e sociais do entorno do empreendimento para a minimização dos impactos porventura existentes. Compreendem os meios físico, biótico e socioeconômico os componentes ambientais inseridos dentro de um raio de 500 metros a partir da poligonal da área de implantação da usina solar.

A área de influência indireta (AII) pode ser definida como uma área mais regional, onde os efeitos são induzidos pela existência do empreendimento e não como consequência de uma ação específica do mesmo, ressaltando-se que a criticidade e a magnitude das adversidades diminui à medida que se afasta da fonte, ou seja, da área de

influência direta. Compreendem os meios físico, biótico e socioeconômico, os componentes ambientais inseridos no território.

A área diretamente afetada (ADA) é aquela área onde as interferências do empreendimento irão gerar alterações diretas nos componentes ambientais, seja durante a fase de implantação, seja durante a fase de operação. Desta forma considera-se como área diretamente afetada aquela de interferência física do projeto. Compreende os meios físico, biótico e socioeconômico da área da poligonal de implantação do empreendimento.

Na implantação, especialmente para grandes centrais geradoras, o projeto materializa-se através das diversas atividades que devem ser realizadas, dentre elas: aquisição dos equipamentos, contratação dos fornecedores de serviços de engenharia, instalação do canteiro de obras, limpeza da área e supressão vegetal, terraplenagem, drenagem, pavimentação dos acessos, edificações, montagem das estruturas, montagem da rede de distribuição, de conexão elétrica e de subestação.

A instalação do canteiro de obras resulta em alteração dos aspectos paisagísticos da área, gerando impactos visuais sobre a paisagem, principalmente por considerar que as estruturas do canteiro de obras, por serem temporárias, não são contempladas com ambientações, paisagismos e outros artifícios que minimizam as alterações na paisagem.

A circulação de veículos e o manuseio de máquinas e equipamentos na área do canteiro, além da deposição de materiais diversos, invariavelmente resultam em lançamento de poeiras e material particulado e emissão de ruídos e gases na atmosfera, alterando assim o padrão da qualidade do ar local.

A ação traz consigo riscos ao patrimônio arqueológico nas áreas onde serão necessárias ações de movimentação de terra (quando existe a possibilidade de destruição total ou parcial de sítios arqueológicos ainda não manifestos). Tais circunstâncias redundam em risco de promover impactos negativos, que, em grande parte estariam concentrados na etapa de instalação, centrando-se na área do canteiro de obras, dos acessos internos e das fundações.

No local são instalados também equipamentos provisórios de água, de esgoto, de energia e de comunicações. A área apresenta aspecto de instabilidade ambiental, em decorrência da brevidade das instalações, do armazenamento de materiais e da presença de equipamentos e de máquinas pesadas, o que reflete em desconforto ambiental.

A instalação e a operação do canteiro de obras, incluindo oficinas, cozinha, banheiros, almoxarifado, etc., todos geradores de resíduos, bem como o transporte de

materiais entre o canteiro e as frentes de serviços, associado ainda ao armazenamento de óleos e de outras substâncias potencialmente poluentes, representam, principalmente em caso de acidentes, risco de contaminação dos solos por substâncias oleosas e/ou por resíduos diversos.

A concentração de trabalhadores no canteiro de obras resulta na produção de resíduos sólidos, efluentes líquidos e águas servidas, o que pode comprometer a qualidade do solo nas áreas circunvizinhas ao canteiro de obras.

Na área do canteiro de obras, é previsível a movimentação de trabalhadores, de equipamentos e de maquinários pesados, refletindo em modificação da ambiência local e em desconforto ambiental.

De acordo com a resolução do CONAMA N°. 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, o gerenciamento dos resíduos deve ser feito de forma adequada para o não comprometimento da qualidade ambiental da área de influência.

O deslocamento de equipamentos e de materiais para a área de implantação do empreendimento resulta em alteração da qualidade do ar em virtude da emissão de gases gerados pelos veículos automotores, sendo um impacto adverso de curta duração. Considerando-se que a ação ocorre ao longo de uma estrutura linear (estradas e rodovias de acesso), para este aspecto, é esperado que haja dispersão rápida ao longo dos trechos percorridos, porém, na área de influência direta os efeitos na qualidade do ar serão mais críticos durante a ação, considerando-a como ponto de chegada e partida dos veículos transportadores.

Para a implantação do projeto, deve ser realizada a limpeza do terreno no local de instalação dos módulos solares fotovoltaicos e da subestação, onde a vegetação é totalmente removida. A limpeza do terreno resulta diretamente em prejuízo à cobertura vegetal, derivando em riscos de acidentes e em injúrias aos animais nas frentes de supressão vegetal.

A intensa mobilização de máquinas e de equipamentos na área, durante a realização da supressão vegetal leva ao afugentamento temporário da fauna, pela emissão de ruídos. A retirada da vegetação provoca a fuga dos animais para áreas conservadas à procura de abrigo e de alimento. Nesta situação, pode ocorrer uma intensificação na competição intra e interespecífica nos fragmentos vegetados do entorno.

Quanto ao processo de escape da fauna, é possível que aumente o número de atropelamentos de animais nas vias que cortam as áreas em obras, pois os mesmos podem

utilizar as vias como corredores para chegar às áreas de entorno que estão preservadas. Tal fato pode acarretar em desequilíbrio temporário das populações animais uma vez que as espécies podem sofrer traumas severos ou mesmo morrer.

A supressão da vegetação expõe bastante a fauna, que poderá sofrer com a perseguição e a caça por parte da população ou dos próprios trabalhadores durante esta atividade, sendo importante a instrução dos operários para que isto não ocorra. Junto a esta adversidade, com o escape da fauna, poderá ocorrer o aumento do risco de acidentes com animais peçonhentos junto à população periférica e aos trabalhadores.

A ação resultará em produção de resíduos sólidos, principalmente de material vegetal como restolhos. A matéria orgânica contida no solo e os restos de vegetação produzidos durante a remoção da cobertura vegetal para a implantação do canteiro de obras e de acessos, resultam diretamente em produção de resíduos sólidos, ressaltando-se que parte da vegetação a ser removida não é aproveitável como material lenhoso. Caso não sejam devidamente manejados para locais apropriados, estes poderão ser carreados para as drenagens.

Quanto à terraplanagem, esta ação resulta em alterações morfológicas no relevo original do terreno da área de intervenção, considerando-se que novas feições serão introduzidas no sentido de adequar a superfície aos objetivos do empreendimento. Este efeito pode ser prognosticado como de pequena magnitude, quando o terreno em questão já for suficientemente planejado, o que minimiza cortes e aterros.

As superfícies trabalhadas ficam com as características geotécnicas alteradas, sendo este efeito localizado.

Quanto às obras de pavimentação e drenagem, deve-se notar que as primeiras ficam restritas às estradas de circulação, enquanto a última compreende todo o empreendimento.

Ambas as atividades ocasionam interferências na morfologia do terreno. Deve-se reconhecer que as alterações morfológicas mais significativas no relevo natural ocorrem por ocasião da terraplanagem, contudo os ajustes do terreno para a implementação dos sistemas de pavimentação e de drenagem ocasionam mudanças pontuais no padrão morfológico estabelecido.

A pavimentação implica em mudanças nas características geotécnicas da camada superficial do solo, com possível enriquecimento deste com material proveniente de jazidas

comerciais, e até mesmo com a compactação da camada do mesmo no trecho destinado ao sistema viário, ou de outras áreas pavimentadas. As intervenções de drenagem também podem alterar as características naturais da camada superficial do solo.

As intervenções para a implantação dos sistemas de pavimentação e de drenagem ocasionam mudanças no fluxo das águas superficiais. Com a compactação do solo, o escoamento das águas pluviais adquire novo padrão, que deve ser previsto no projeto de drenagem.

As atividades a serem executadas envolvendo mobilização de materiais terrosos invariavelmente resultam na geração de poeiras, bem como o uso do maquinário para a execução desta atividade que emite certa quantidade de gases provenientes da combustão dos motores. Estes impactos degradam pontualmente e com curta duração a qualidade do ar. Os sons emitidos pelos equipamentos, bem como os diálogos dos operários, se caracterizam como interferências na sonoridade do ambiente.

Alguns riscos de acidentes são inerentes às atividades a serem executadas nos projetos de pavimentação e drenagem. Estes riscos são minimizados com a utilização dos equipamentos de proteção individual e coletiva, bem como com a adoção de práticas de segurança no trabalho.

Quanto à construção das fundações, deve-se notar que esta fase resulta em instabilidade paisagística e degradação ambiental do local em obras, sendo que este efeito perdurará até que seja concluída a ação. Destaca-se que esta ação, embora seja distribuída ao longo da área selecionada, pode ser considerada pontual.

A instalação das fundações gerará alteração geotécnica e morfológica nos locais trabalhados, sendo este efeito localizado, em relação ao tamanho da área do projeto.

Na fase de instalação das fundações do empreendimento, o manejo de materiais e o próprio procedimento da ação refletem em desconforto ambiental e em degradação da paisagem. Todavia, este efeito é visto como de pequena magnitude por se considerar que, após a instalação de cada fundação, as áreas do entorno serão recompostas em seus aspectos paisagísticos.

Os módulos são instalados na área do empreendimento, em bases já preparadas, o que minimiza os efeitos de sobrecarga no terreno ou de alteração da superfície. A introdução dos equipamentos no local causa impactos sobre a paisagem, posto que se tratam de estruturas não usuais na região, as quais se destacarão em meio à paisagem.

Durante a instalação os efeitos à paisagem são adversos devido ao contraste gerado pela construção da usina no ambiente, muito embora que na fase operacional, o local tenha potencial para passar a ser atrativo e a se destacar na paisagem da região, em razão do realce estético no ambiente. Deve-se considerar que em um primeiro momento, a população poderá sentir os impactos sobre a paisagem com a introdução dos módulos fotovoltaicos no meio ambiente. Os equipamentos se diferenciam de outras formas de ocupação mais comuns na região, o que certamente atrairá a atenção da população.

Na instalação de alguns equipamentos, podem ser emitidos gases, em decorrência do uso de tintas "spray", soldas, solventes e outros produtos químicos, os quais poderão ocasionalmente alterar a qualidade do ar.

Durante a instalação dos equipamentos pesados, os trabalhadores envolvidos ficam expostos a riscos de acidentes de trabalho, bem como podem ocorrer acidentes ambientais por falhas de implantação, ou uso incorreto dos equipamentos de segurança. Durante a ação o ambiente ficará vulnerável a adversidades sobre os aspectos paisagísticos em decorrência da exposição dos equipamentos nos locais de montagem, sendo este efeito de curta duração, considerando-se que após a ação será feito o resgate das condições naturais das superfícies de entorno.

Considerando-se que a montagem dos módulos envolve o manuseio de peças de tamanhos variados e também o uso de equipamentos pesados, os riscos de acidentes de trabalho e ambientais são potenciais.

Para instalação da subestação são feitas intervenções nas superfícies naturais para conformação morfológica e geotécnica da área a ser ocupada. Desta forma, são prognosticadas alterações nos citados parâmetros ambientais devido à execução de terraplanagem para construção do piso de base da subestação. Todas estas intervenções, com corte e aterros geram alterações na paisagem.

Durante as intervenções na área da subestação, ocorrem alterações na dinâmica ambiental, prevendo-se uma maior mobilidade dos sedimentos arenosos, desencadeando processos de erosão, de transporte e de sedimentação.

Em decorrência da movimentação de terra, do manejo de materiais e da mobilidade de veículos e de pessoas no local pode ocorrer instabilidade temporária no ambiente em obras, tratando-se de um impacto de curta duração e de pequena magnitude, pois

se espera que estes efeitos sejam eliminados com as ações de recuperação das áreas degradadas ao final das obras.

Efeitos ambientais negativos são gerados durante a ação de manejo de materiais pesados com uso de equipamentos de grande porte, prevendo-se o lançamento de poeiras fugitivas e a emissão de ruídos, alterando localmente a qualidade do ar e a sonoridade do ambiente natural.

A desmobilização do canteiro de obras compreende o final da fase de instalação do empreendimento, quando todos os equipamentos deixam a área de intervenção das obras e quando o canteiro de obras é definitivamente removido.

Nesta fase do empreendimento, alguns efeitos decorrentes da fase de instalação deixam de ocorrer, principalmente, aqueles relativos à alteração da qualidade do ar e dos níveis de ruídos, perturbação da fauna, desconforto ambiental e poluição visual.

A ação de desmobilização traz efeitos positivos para a área que sofreu alterações decorrentes das obras de implantação, pois ao longo da faixa afetada deve ser feita a regularização da superfície. Nas vias de acesso devem ser retirados todos os empecilhos que possam surgir no transcorrer da instalação do empreendimento (restos de materiais terrosos, materiais construtivos, peças descartadas, etc.). As cavas ou ressaltos topográficos, formados durante as obras são eliminados, de modo que estas áreas fiquem livres de elementos gerados pelo empreendimento que possam causar impactos sobre a paisagem.

Desta forma, considerando-se que todos os resíduos sólidos e as sobras de produtos do empreendimento sejam removidos das vias de acesso e das suas margens, é previsível que ocorra uma estabilização da qualidade ambiental em relação à situação do ambiente no período da obra, quando também se espera a minimização dos desconfortos ambientais.

Com a limpeza da obra, é previsível que ocorra a resiliência das camadas superficiais dos solos nas áreas adjacentes às vias de acesso e nos pátios de manobras, o que refletirá em melhoria dos aspectos orgânicos com vista à regeneração de coberturas herbáceas, que, mesmo sendo de pequeno porte, terá a função de protegê-los contra processos erosivos.

Diante dos fatos apresentados, quanto aos impactos ambientais causados pela implantação de grandes centrais de geração, pode-se concluir o quanto os estudos ambientais são importantes para que as medidas corretas de prevenção a maiores danos sejam tomadas.

3.3 Fim da Operação

Ao fim dos 25 anos estimados de vida útil dos módulos, a maioria precisará ser substituída por equipamentos novos que possam gerar energia com valor competitivo, que pode já não ser o caso desses cujos anos já reduziram significativamente sua capacidade de produção.

Não significa, porém, que esses módulos necessariamente irão ser substituídos, ou desativados, principalmente nos casos de projetos residenciais, onde não há uma preocupação tão grande quanto ao fator de capacidade.

Todavia, os projetos residenciais representam uma porcentagem mínima frente aos comerciais e aos projetos de geração centralizada, que por questões de competitividade, precisarão prever atualizações dos módulos, haja vista que a eficiência dos mesmos garante fatores de capacidade que compensem os altos investimentos envolvidos.

O descarte irresponsável, seja por pequenos produtores de energia ou por grandes centrais geradoras, traz um risco não só em relação ao volume gigantesco de resíduo que será gerado, mas também ao meio ambiente e à saúde humana.

No item a seguir, será apresentado o panorama do setor de energia fotovoltaica no mundo e no Brasil para que se entenda a dimensão da quantidade de módulos que virá a desativada nos próximos 30 anos.

Não desmontar, não reciclar, ou não destinar corretamente todo o volume gerado pode trazer prejuízos ambientais significativos, prejudicando a sustentabilidade da fonte.

Faz-se, portanto, necessário que sejam desenvolvidos planos de ações para a destinação final desses módulos, seja reinserindo-os na cadeia produtiva, através de processos de desmonte, de remanufatura e de reciclagem, ou destinando os módulos com eficiências inferiores a mercados secundários que absorvam esses produtos e que estendam, assim, suas vidas úteis.

4. PANORAMA DO SETOR

4.1 Mundo

O mercado de energia solar fotovoltaica no mundo tem crescido nos últimos anos, tendo sua expansão justificada, principalmente, pelo aumento da competitividade do setor com a entrada de grandes fabricantes chineses e também pelo aumento da demanda por eletricidade e pelo reconhecimento em muitos países do potencial competitivo da geração de energia elétrica a partir da fonte em questão.

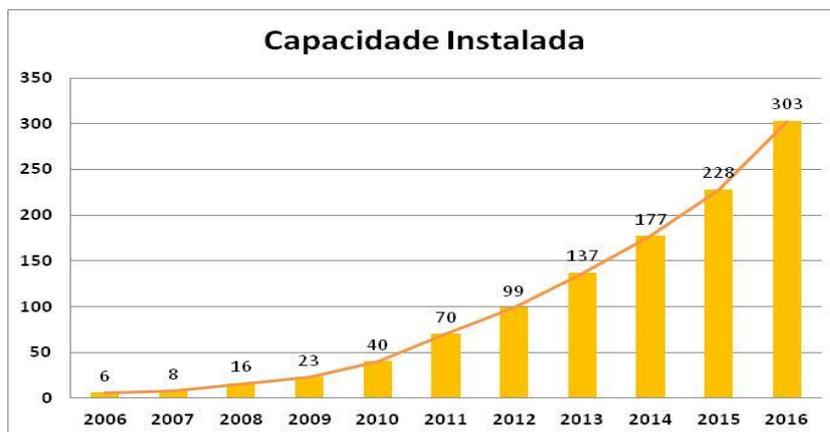
De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês), no relatório *Key World Energy Statistics* (Principais estatísticas mundiais de energia) publicado em 2017, no período de 1990 a 2015 a energia solar fotovoltaica cresceu no mundo 45,5% em média, por ano.

De acordo como relatório de status global de 2017 do REN21, somente em 2016, os 75 GW instalados ao redor do mundo corresponderam a mais de 31 mil módulos instalados a cada hora. Em razão da grande proporção de módulos produzidos ainda ser de células cristalinas, a quantidades dessas aumentou significativamente em 2016.

Agências internacionais, como IEA e IRENA, apontam que em 2020, essa capacidade, mostrada na figura 6, deve aumentar para 500 GW e que até 2050, deve atingir 4.500 GW em todo o mundo. Esse crescimento de mercado, a alta capacidade produtiva de países como China e o decréscimo dos preços impulsionam a energia solar fotovoltaica, mas também geram uma preocupação quanto à produção de resíduos e de materiais a serem descartados no futuro.

A figura 7 apresenta o crescimento da capacidade instalada global de energia solar fotovoltaica no período de 2006 a 2016. Pode-se observar que em apenas dez anos, esse setor cresceu significativamente, demonstrando o potencial mundial de aproveitamento da fonte e de capacidade de suprimento de equipamentos dos fabricantes.

Figura 7 - Capacidade Instalada Global de Energia Solar Fotovoltaica (GW)

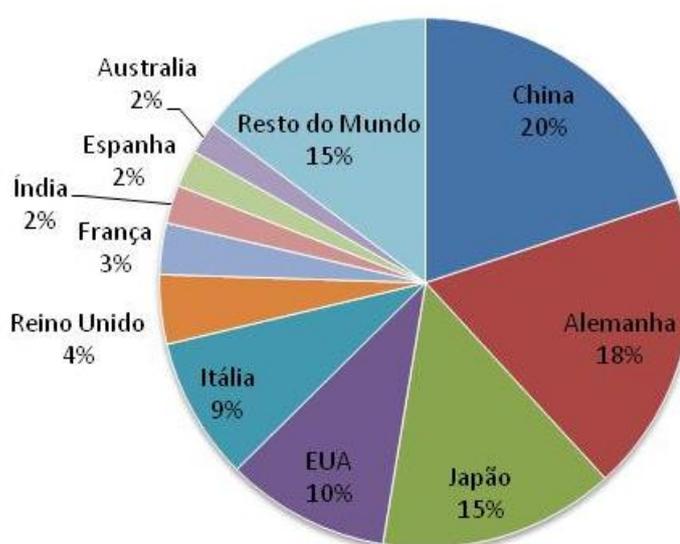


Fonte: Adaptado de REN21 (2017)

Devido a alta capacidade produtiva, especialmente da China, os preços dos módulos caíram cerca de 29%, chegando a US\$ 0,41 (quarenta e um centavos de dólar americano) por watt no último semestre de 2016. Essa queda de preços tem desafiado fabricantes a buscar redução de custos de manufatura, que não têm tido o mesmo rápido decréscimo que as vendas, causando grandes impactos às margens.

Os países com as maiores capacidades instaladas estão representados na figura 8:

Figura 8 - Capacidade instalada de solar fotovoltaica de 2015



Fonte: Adaptado de IEA (2017)

A logística reversa e a reciclagem de componentes de módulos futuramente poderá ser uma boa alternativa para a redução, não apenas dos danos ambientais que podem ser causados pelo descarte indevido destes equipamentos, mas também para reduzir os custos de produção e para contribuir para que a indústria solar fotovoltaica consiga seguir com vendas competitivas e com margens que possibilitem seu crescimento.

Já existem esforços sendo feitos para avançar com os processos de reciclagem dos módulos, ainda que a demanda atual seja pequena. Segundo dados do relatório de IRENA (2016) a Reclaim PV da Austrália, associou-se aos principais fabricantes para que pudesse refinar seus processos; nos EUA, foi lançado um programa na indústria cujo objetivo é tornar a indústria nacional livre de aterro; e no Japão, as empresas NPC e Hamada se juntaram para que pudessem reciclar 80% dos materiais dos módulos e para reutilizar o resto.

Apesar dos esforços tomados, com maior significância a ser dada ao continente europeu, que será discutido com maior profundidade no item 5.1, ainda há um longo caminho a ser percorrido para dar a atenção necessária a esse problema que será gerado no mundo inteiro, se as medidas preventivas corretas não forem devidamente tomadas.

4.2 Brasil

Os constantes investimentos em energias renováveis, a necessidade de utilizar tecnologias mais “limpas” para produção de energia e a relevância para o crescimento e para a diversificação da matriz energética do país, bem como seu favorecimento geográfico para o recebimento de uma quantidade média de irradiação solar, têm atraído cada vez mais interesse em investir em energia solar fotovoltaica.

Os incentivos públicos têm sido fundamentais para o desenvolvimento deste setor. O Brasil vem apresentando um crescimento notável no número de projetos instalados, principalmente após a aprovação da resolução 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamentou o sistema de geração distribuída no país e que iniciou uma nova era para a geração de energia elétrica através da energia solar fotovoltaica.

É certo que as dificuldades de financiamentos ainda freiam o avanço do setor no país, mas o potencial de produção, aliado ao enorme mercado, às demandas crescentes de energia e aos aumentos no preço do quilowatt, têm atraído investidores e movimentado esse mercado.

Uma vantagem estratégica para o setor no país foi dada ao incluir, em 2014, a fonte no 6º Leilão de Energia de Reserva (LER), onde foram contratadas 889,7 MW, com preço médio de R\$ 215,12/MWh. Foram negociados 31 projetos. Esse resultado, como apontou o estudo realizado pela WWF-Brasil em 2015, foi o primeiro sinal positivo para o desenvolvimento da cadeia produtiva solar fotovoltaica no país.

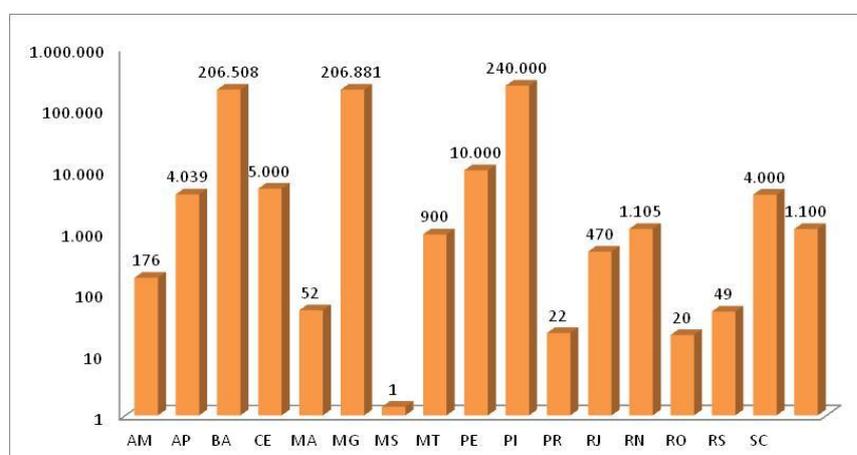
Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL, as usinas solares fotovoltaicas ainda representam uma parcela pequena na matriz brasileira em termos de empreendimentos em operação. Todavia, percebe-se que o setor tem números significativos, como aponta o quadro 3, cujos dados foram extraídos do Banco de Informações de Geração da ANEEL, para o setor de energia solar fotovoltaica na matriz brasileira, e, na figura 9, é mostrado como estão divididos os projetos que atualmente estão operando no Brasil, em cada estado.

Quadro 3 - Usinas Solares Fotovoltaicas no Brasil

Status	Quantidade	Potência Outorgada (MW)	% em relação à matriz
Operação	72	680,33	0,42
Construção	36	792,92	7,63
Construção não iniciada	59	1.216,42	12,24

Fonte: ANEEL (2017)

Figura 9 – Potência outorgada em operação por estado (kW)

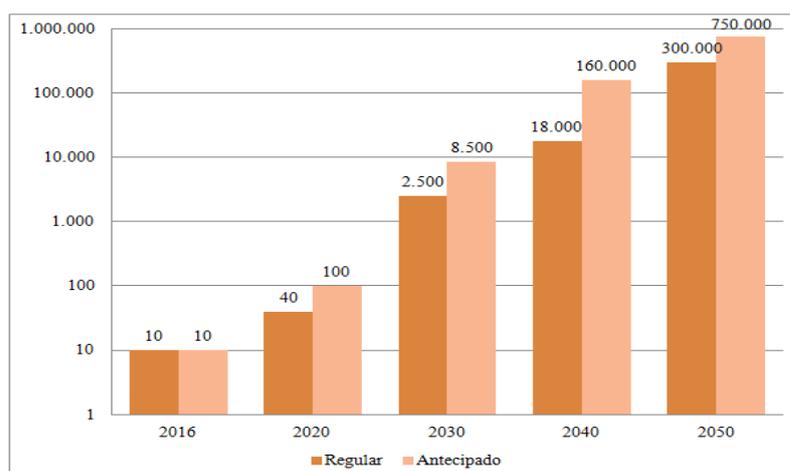


Fonte: ANEEL (2017)

Em termos de equivalência média de módulos, levando-se em consideração que a potência deles varia, desde módulos de silício cristalino menores, aos maiores que são capazes de entregar mais de 320 W cada, e adotando uma média de 275 W por módulo instalado no país, há um total aproximado de 2,5 milhões de módulos atualmente operando e, a partir de meados de 2040, passarão a ter seus rendimentos reduzidos e iniciando os processos de substituição. Considerando uma massa média por módulo de 22 kg, a quantidade de módulos operando no país atualmente, já representa mais de 54 mil toneladas a serem futuramente descartados.

O relatório em questão apresenta as projeções de rejeitos para cada país. Seguindo a intenção do presente trabalho de avaliar os potenciais do futuro dos módulos instalados no Brasil, com base nos resultados apresentados no relatório da IRENA, na figura 10 apresenta os resultados, em toneladas, que foram modelados para o Brasil, considerando os módulos fotovoltaicos a serem desativados até 2050.

Figura 10 - Resultados estimados cumulativos de resíduos gerados no fim da vida dos módulos no Brasil (em toneladas)

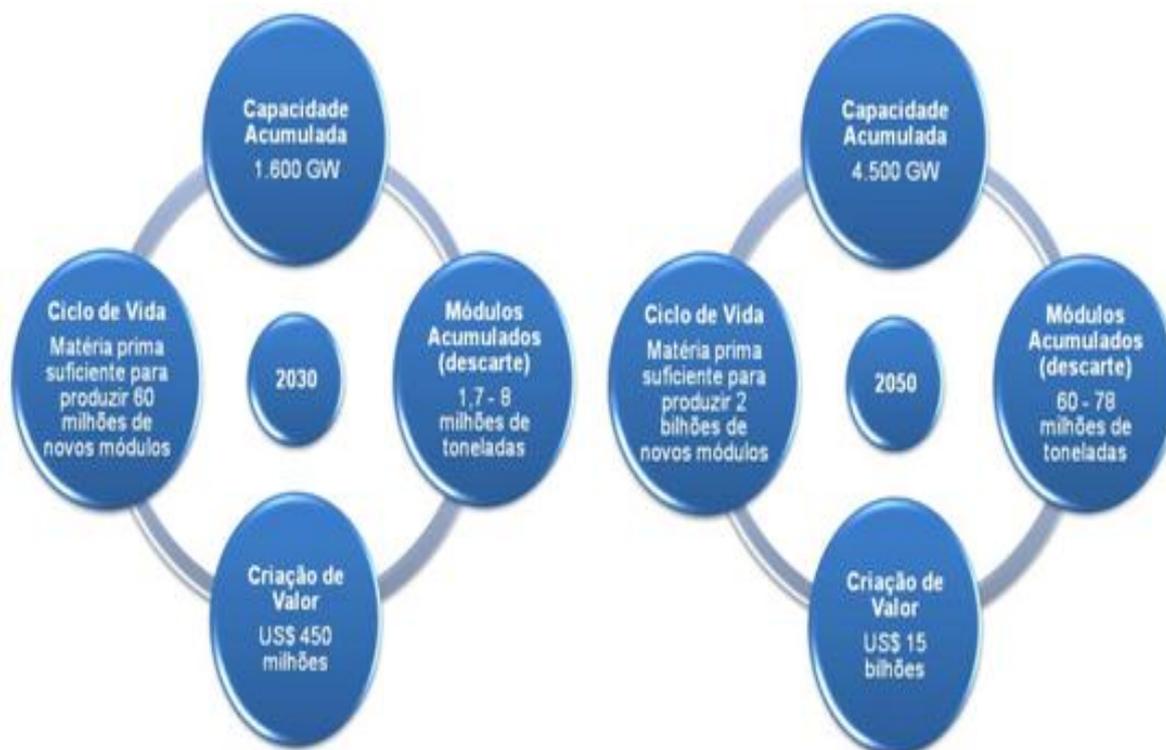


Fonte: Adaptado de IRENA (2016)

Esses módulos, que futuramente serão substituídos, podem gerar uma nova cadeia de valor, com os incentivos a programas de desmonte, de reciclagem e de reuso de materiais, no lugar de apenas gerarem poluição. Mas, para que isso aconteça, não basta que o país se resguarde apenas em sua Política Nacional de Resíduos Sólidos, que será discutida no item 5.2, mas é preciso que se criem mecanismos de incentivo à reciclagem e legislações específicas para o mercado de energia solar, como as que existem na União Europeia.

A figura 11 apresenta o potencial de criação de cadeias de valor a partir de módulos em fim de vida que podem ser aplicados ao mercado brasileiro. Na figura, adaptada de IRENA (2016), pode-se ver que a capacidade acumulada até o ano de 2050 é capaz de produzir matéria prima suficiente para a produção de dois bilhões de novos módulos.

Figura 11 - Potencial de criação de valor no fim de vida dos módulos



Fonte: Adaptado de IRENA (2016)

4.3 Resíduos gerados

Conforme o mercado de energia solar fotovoltaica aumenta, o volume de módulos produzidos e futuramente desativados também aumenta. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, em inglês), considerando as projeções de capacidade instalada da Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês), serão 1.630 GW de módulos instalados e 1,7 milhões de toneladas de resíduos gerados por esses. Até 2050, a projeção é que esse número cresça para 4.500 GW instalados e 60 milhões de toneladas de resíduos.

É preciso olhar também para o fato de que nem todos os módulos instalados passam os 25 anos funcionando conforme o esperado. Existem falhas que podem ocorrer nos

primeiros quatro anos após a instalação, que são decorrentes de falhas no projeto, ou no transporte, ou até mesmo no momento de instalação. Essas falhas se agravam e podem comprometer os sistemas em que estão instalados, levando a substituições precoces desses módulos. Outros defeitos, decorrentes de avarias e de desgaste natural dos equipamentos ocorrem também o que levaria a mais substituições.

Hoje, países como China, Estados Unidos e Japão lideram o mercado de energia solar fotovoltaica e as projeções de acúmulo de resíduos também acompanham o crescimento do mercado nesses países. Apesar disso, até o momento, apenas a União Europeia (UE) adotou políticas para os resíduos gerados pelos módulos, especialmente no fim da vida desses. Essas políticas serão abordadas no item 5.1.

Por enquanto, a maioria dos países classifica os módulos como resíduos industriais gerais e em casos como nos Estados Unidos e no Japão, algumas regulações podem incluir testes contra materiais perigosos e orientações quanto ao transporte, ao tratamento, à reciclagem e ao descarte.

O gerenciamento dos módulos, ao fim de seus ciclos de vida, possui um potencial significativo para a cadeia de valores. A reciclagem dos módulos pode gerar uma quantidade significativa de matérias primas e de componentes valiosos, recuperar esses materiais, bem como reinseri-los no mercado, melhorando não só aspectos econômicos, mas aumentando a seguridade do suprimento das matérias primas no futuro, como mostra relatório da IRENA.

Segundo o relatório supracitado, com base em valores de 2016, estima-se que o mercado de recuperação de materiais dos módulos até 2030, irá movimentar cerca de 450 milhões de dólares. E, segundo o mesmo relatório, este valor é o equivalente à quantidade necessária para produzir aproximadamente 60 milhões de novos módulos, ou uma capacidade de produção aproximada de 18 GW. Até 2050, a projeção é de que esse mercado de recuperação de módulos gire em torno de 15 bilhões de dólares, o que seria equivalente a 2 bilhões de módulos, ou 630 GW.

O modelo utilizado para o cálculo da perda de módulos, realizado por IRENA, baseou-se na metodologia apresentada no quadro 4.

Os cenários foram modelados conforme a tabela 4 e seguindo a equação 6, onde t representa o tempo em anos, T é a média de vida útil, assumida como 30 anos e α é o fator de forma que controla a forma da curva de Weibull e que para o estudo, teve valor de 5,3759 para as perdas regulares e de 2,4928 para as perdas antecipadas.

$$F(t) = 1 - e^{-(t/T)^\alpha} \quad (6)$$

Quadro 4 - Hipóteses para levantamento de projeções das perdas de módulos

Hipóteses de Cenário de Perda Regular	
30 anos de vida útil do módulo	
99,99% probabilidade de perda após 40 anos	
Utilização do Modelo Weibull	
Hipóteses de Cenário de Perda Antecipada	
30 anos de vida útil do módulo	
99,99% probabilidade de perda após 40 anos	
Inclusão de Pontos de Suporte para Regressão não Linear	
Instalação/Danos de Transporte: 0,5%	Perdas 2 primeiros anos: 0,5%
Perdas Após 10 anos: 2%	Perdas Após 15 anos: 4%

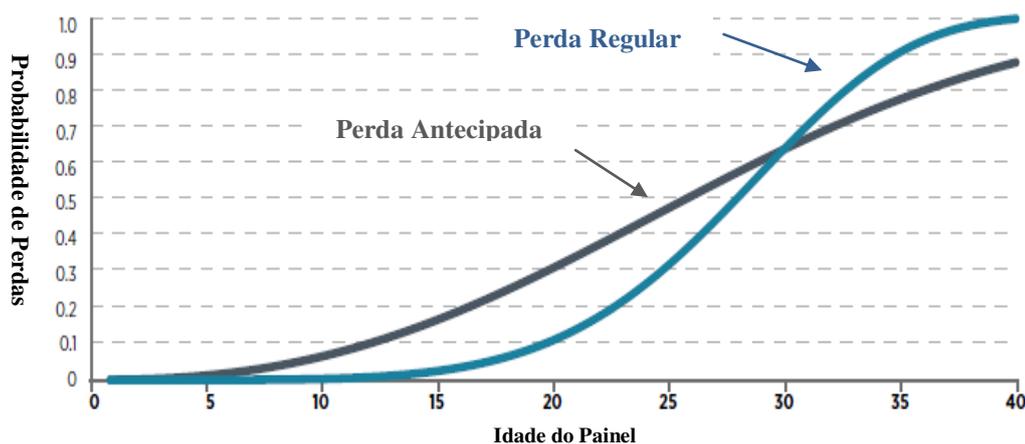
Fonte: IRENA (2016)

A linha azul representa o fator de perda regular, enquanto a linha cinza apresenta o cenário para perdas antecipadas, na figura 12. Nesse gráfico, é possível observar as probabilidades de perdas conforme o passar dos anos.

Logicamente, o modelo adotado pela agência não considerou todos os possíveis cenários, em razão das diferentes tecnologias aplicadas no mercado de energia solar atualmente. Todavia, a intenção principal é dar noção estatística da magnitude e da direção de perdas do setor ao longo dos anos, em vez de precisar valores.

A classificação dos resíduos dos módulos segue a classificação básica dos resíduos, onde o volume, as propriedades dos componentes e os materiais utilizados, são levados em consideração. Essa classificação é útil para que o manejo adequado seja dado aos resíduos e para que esses possam ser reutilizados, recuperados, reciclados ou, até mesmo, eliminados, minimizando, assim, os impactos ambientais.

Figura 12 - Curvas de Weibull



Fonte: IRENA (2016)

Até 2015, dois terços dos módulos instalados no mundo eram de silício cristalino, sendo 90% de sua massa composta por vidro, alumínio e polímeros, que podem ser reciclados.

Portanto, percebe-se o quanto é necessário que programas que gerenciam esses resíduos sejam criados e o quanto o volume de módulos a serem desativados tem potencial de geração de uma cadeia de valor inteira, permitindo que novos módulos sejam fabricados, criando novos mercados, novas oportunidades de emprego e mantendo a sustentabilidade da fonte.

5. PROGRAMAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

5.1 Modelo europeu

A União Europeia (UE) foi pioneira nas regulações quanto aos resíduos do mercado de energia solar fotovoltaica, que cobrem desde a coleta e a recuperação dos módulos até sua reciclagem.

Desde os anos 90, o continente europeu viu o mercado de geração de energia elétrica, a partir dos módulos fotovoltaicos, crescer significativamente. Diante disto, a UE determinou que fabricantes, vendendo módulos no continente, responsabilizassem-se pelo manejo desses no fim da vida.

Baseando-se em princípios de responsabilidade estendida dos fabricantes, a Diretiva de Resíduos Elétricos e Eletrônicos da UE (WEEE, sigla em inglês), determina que os fabricantes de módulos solares, independentemente de onde estes estejam sediados, financiem os custos de coleta e de reciclagem dos módulos ao fim da operação, que forem instalados no continente europeu. Essa combinação de responsabilidade legal do fabricante para o fim da vida do produto, com metas específicas de coleta, de recuperação e de reciclagem, e os requisitos mínimos de tratamento, que podem trazer a proteção ao meio ambiente e à saúde humana, podem ser pontos de referência para o desenvolvimento da regulamentação dos resíduos gerados pelo setor.

A diretiva determina que os produtores cumpram responsabilidades como:

- a) financeira, em que os fabricantes são responsabilizados através das garantias financeiras que cobrem os custos de coleta e de reciclagem dos produtos, bem como o financiamento de pontos de coleta públicos e de locais de tratamento dos níveis primários desses produtos;
- b) reportada, em que os fabricantes são obrigados a reportar mensalmente, ou anualmente, os módulos vendidos, os módulos retornados e as destinações desses, bem como seu tratamento. Este sistema permite que os fabricantes apresentem também seus resultados quanto ao tratamento dos resíduos;
- c) de informação, em que os fabricantes são responsáveis pela rotulagem do módulos de acordo com a diretiva, devendo informar aos compradores que os módulos deverão ser descartados em instalações de coletas dedicadas, que esses não devem ser misturados à outros resíduos e que o retorno e a reciclagem são gratuitos. Os fabricantes devem informar também aos seus clientes quais são os procedimentos de fim de vida dos módulos. Por fim, é de responsabilidade dos fabricantes o fornecimento de informações a empresas de tratamento de resíduos sobre como lidar com os módulos durante a coleta, o armazenamento, o desmonte e o tratamento, incluindo informações específicas quando aos materiais perigosos.

Essa diretiva prevê que com as ações tomadas, 85% dos equipamentos serão recuperados e 80% serão reciclados, até 2018.

Quanto ao financiamento, duas abordagens são apontadas pela diretiva:

- a) pré-financiamento individual, ou esquemas de responsabilidade coletiva;
- b) arranjos contratuais entre fabricantes e clientes.

Na implementação da diretiva, a primeira abordagem, de pré-financiamento para coleta e para reciclagem, se provou prática apenas para resíduos eletrônicos vendidos em baixas quantidades, não se mostrando muito rentável para os módulos fotovoltaicos. Por outro lado, esquemas que combinavam acordos de pagamento por ação, que é um sistema de pagamento conforme os custos aparecem, combinadas a seguros de responsabilidade múltipla entre fabricantes e últimos consumidores mostram-se mais atrativos.

Os seguros mencionados são esquemas de proteção, para o caso de todos os fabricantes desaparecerem do mercado. Nessa situação, o seguro é usado para cobrir os custos de coleta e de reciclagem.

Nesse sistema de responsabilidade conjunta, os fabricantes, ou grupo de fabricantes dos módulos concordam em aceitar os passivos da coleta e da reciclagem dos resíduos.

Na Alemanha, país pioneiro do setor, cuja previsão de capacidade cumulativa de módulos até 2050 deve ultrapassar os 4 milhões de toneladas de resíduos, segundo relatório da IRENA (2016), desde 2015, a diretiva foi transposta à lei alemã e revisada para que novos requisitos de cobrança e de reciclagem dos módulos no país pudessem entrar em vigor desde aquela data. O país aprovou disposições específicas para a coleta, para a recuperação e para a reciclagem dos módulos, estabelecendo uma série de garantias financeiras que todos os fabricantes devem providenciar para os novos módulos vendidos.

O cálculo dessas garantias depende da forma de financiamento escolhida pelos fabricantes. Aquele que escolhe o regime de responsabilidade conjunta para os módulos vendidos direto aos consumidores, pode seguir a fórmula simplificada:

$$CR = QBR \times TRP \times CPD \quad (7)$$

CR representa o custo de responsabilidade, QBR é a quantidade básica para registro (toneladas de módulos postas no mercado), TRP é a taxa de retorno presumida (%) e CPD são os custos presumidos de descarte (Euro/tonelada).

Para os módulos vendidos em regimes contratuais entre empresas, a Alemanha permite que os arranjos sejam feitos entre as partes, desde que os requisitos legais sejam cumpridos.

O país ainda estabeleceu uma categoria de coleta diferenciada para os módulos que fornece tanto a coleta quanto o tratamento desses resíduos em pontos de coletas municipais, facilitando assim que proprietários residenciais de módulos possam descartá-los em um desses pontos, gratuitamente.

Um exemplo interessante foi a iniciativa PV CYCLE que é uma organização sem fins lucrativos europeia que oferece serviços de gerenciamento de resíduos em conformidade com as diretivas. Fundada em 2007, essa organização que é voltada para a indústria fotovoltaica, conseguiu atingir uma taxa de reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício de 96% em 2016. A organização consegue lidar não apenas com os módulos, mas resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, baterias, resíduos industriais e de embalagens também.

O PV CYCLE oferece todos os serviços quanto ao cumprimento da diretiva, como a coleta e o tratamento dos resíduos, oferece consultoria, desmonte, programas de gerenciamentos e serviços nacionais. A organização também atua fora na União Europeia, porém, oferece apenas os serviços de gerenciamento de resíduos de acordo com as necessidades específicas de cada cliente.

5.2 Legislação brasileira

De acordo com Pereira (2012), grande parte das legislações existentes acerca dos bens de pós-venda e de pós-consumo exige dos fabricantes a responsabilidade sobre esses produtos através de programas como os de EPR (sigla em inglês para Responsabilidade de Produto Estendida) e de PTB (sigla em inglês para Retirada de Produto). O autor aponta que apesar de já existirem muitos exemplos de países que se preocupam com o fim da vida dos produtos que circulam, ainda há muitos que não possuem legislações específicas e que tampouco existe a consciência da responsabilidade ambiental entre seus consumidores.

O autor supracitado evidencia a necessidade de haver uma cumplicidade entre o poder público e a sociedade para que os mecanismos de regulamentação sejam elaborados e controlados e para que haja um cumprimento efetivo das normas, tornando possível a disposição segura e correta dos produtos, seja para reutilização, para reciclagem, ou para a geração de energia.

No Brasil, diversas ações vêm sendo adotadas por governos para garantir a proteção ao meio ambiente. No quadro 5 é apresentada uma evolução histórica de atividades para o desenvolvimento sustentável do país.

Quadro 5 - Evolução histórica das principais atividades para o desenvolvimento sustentável do Brasil

ANO	EVENTO	OBJETIVO
1973	Criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA)	Subordinada ao Ministério do Interior e passa a cuidar da preservação da natureza.
1981	Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981	Política Nacional de Meio Ambiente.
1986	1ª Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente	Estabelece padrões para os estudos de impacto ambiental no país.
1989	Criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA)	Fusão do Sema, Sudepe, Sudhevea e IBDF tendo como objetivo a preservação ambiental.
1992	RIO-92 (Cúpula da Terra)	Reunião de 120 chefes de Estado de mais de 170 países que resultou na criação da Agenda 21 e do Tratado de Educação Ambiental para Sociedades Sustentáveis.
1998	Lei 9.605 – Lei sobre crimes ambientais	Sanções penais e administrativas de práticas e atividades lesivas ao meio ambiente.
2002	Decreto 4.074/2002 – Lei de Descarte de Embalagens de Agrotóxicos	Disposição final de embalagens de produtos agrotóxicos.
2010	Lei 12.305 de 2/8/2010	Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

Dentro do tema discorrido pelo presente trabalho, a lei 12.305 de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010, tem um papel importante na busca de uma destinação adequada aos módulos solares fotovoltaicos.

Segundo a referida lei, todas as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis direta ou indiretamente pela geração de resíduos sólidos, e as que

desenvolvam ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos, estão sujeitas à observância da mesma.

São objetivos da lei 12.305, de agosto de 2010:

- a) proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- b) não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- c) estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- d) adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- e) redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- f) incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- g) gestão integrada de resíduos sólidos;
- h) articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
- i) capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
- j) prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - produtos reciclados e recicláveis;
 - bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis.
- k) integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- l) estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- m) incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
- n) estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

A autora deste trabalho interpreta que, devido à ainda recente presença dos equipamentos para geração de energia elétrica a partir da energia solar, a devida atenção aos

pontos citados pelo artigo 3o. da lei 12.305 (acordo setorial com vista em responsabilidade compartilhada, área contaminada, área órfã contaminada, ciclo de vida do produto, coleta seletiva, controle social, destinação final ambientalmente adequada, disposição final adequada, geradores e gerenciamento de resíduos sólidos, gestão integrada de resíduos sólidos, logística reversa, padrões sustentáveis de produção e consumo, etc.) ainda não está sendo dada.

Para observar tais preocupações, seria necessário um entendimento no acordo setorial para evidenciar a responsabilidade, que hoje é compartilhada pelo ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos.

Além disso, é de conhecimento geral que os módulos contêm componentes químicos que assim como qualquer substância ou resíduo, devem ser dispostos em local apropriado visando a mitigação do risco de contaminação de áreas.

O referido artigo trata o ciclo de vida do produto como a série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e de insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final. No Brasil, ainda são poucos os fabricantes produzindo módulos fotovoltaicos em território nacional, todavia a utilização desses e a disposição final dos mesmos precisam ser cuidadosamente observadas.

A autora entende que o controle social é de responsabilidade dos poderes públicos, envolvendo a elaboração de mecanismos e de procedimentos que formulem, implementem e avaliem a situação do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos no país.

O artigo 3o. da lei 12.305 define ainda a destinação final ambientalmente adequada como sendo a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos ambientais competentes, entre elas a disposição final.

Para a realidade brasileira da energia solar fotovoltaica, são necessárias implementações de políticas públicas de incentivo à reutilização de módulos fotovoltaicos que ainda possam operar, ainda que com rendimento reduzido; além disso, o incentivo ao desmonte desses equipamentos e à reciclagem dos mesmos traria não só benefícios ambientais claros, como econômicos. Atividades como essas incentivariam a distribuição ordenada dos módulos ao fim da vida deles, evitando que os mesmos se acumulem em aterros ou outros locais indevidos, evitando riscos à saúde pública e os impactos ambientais.

Segundo a referida lei, todas as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, são consideradas geradoras desses resíduos. Este conceito leva à interpretação de que desde os fabricantes dos módulos fotovoltaicos aos clientes que instalam a tecnologia, em suas casas ou comércios, por exemplo, são geradores de resíduos sólidos e, portanto, são legalmente responsabilizados pelo ciclo de vida dos mesmos. A grande dúvida está em quem será responsável pelos processos de destinação final.

A determinação dos responsáveis pelo gerenciamento dos módulos fotovoltaicos ao fim de seus ciclos de vida possibilitaria a elaboração clara de responsabilidades quanto às etapas de coleta, transporte, desmonte, reciclagem e destinação final.

O artigo 3º. Da Lei 12.305 denomina a logística reversa como um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Todavia, entende-se que só existe sentido em praticar logística reversa se houver meios necessários, em termos de legislação, de incentivos públicos e de interesse privado em viabilizar a coleta dos módulos e a sua destinação adequada.

O artigo 3º. Da lei 12.305, aponta ainda o conceito de reciclagem como sendo o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes.

Já existem tecnologias disponíveis para o aproveitamento de grande parte dos módulos fotovoltaicos ao fim de seus ciclos de vida. A aplicação dessas tecnologias, aliada aos processos de logística reversa e apoiadas pela legislação vigente, não só é um benefício ambiental e social evidente, como pode trazer benefícios econômicos para o Brasil.

6. LOGÍSTICA REVERSA

Existem inúmeras razões para a aplicação de logística reversa para mover produtos de volta aos fabricantes, como legislações, preocupações com o meio ambiente,

políticas de retorno de produtos, questões de garantia e, as que mais interessam aos empresários, questões econômicas associadas à redução de custos de produção.

Prata (2012) aponta que muita atenção é dada aos sistemas de distribuição física e que pouca atenção é dada aos canais reversos, devido à desvalorização econômica e à complexidade em relação à logística direta.

Classicamente, a principal preocupação da indústria está voltada aos aspectos econômicos. Produzir em quantidades ideais para atender às demandas dos mercados, transportar e entregar aos consumidores esses produtos a custos otimizados tem sido o grande desafio de profissionais de logística e de cadeia de suprimentos. Muito já foi desenvolvido para que os sistemas de logística direta possam ser aplicados a diversas situações, visando o melhor tempo e o menor custo.

Entretanto, dado às crescentes preocupações com meio ambiente e obrigados com legislações ambientais, muitas empresas ao redor do mundo têm enfrentado o desafio de elaborar planos para que os canais reversos possam contribuir com uma diminuição na poluição causada pelo despejo indevido de seus produtos.

Desenvolver sistemas que consigam atender as demandas e que funcionem de modo generalizado é um desafio grande, principalmente quando os aspectos que cercam os problemas de retornar produtos envolvem muitas variáveis que dificultam a modelagem desses sistemas.

A logística representa um importante papel dentro das empresas e segundo Ballou (2006), pode ser definida como o processo de planejamento, de implantação e de controle de fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, e de serviços e de informações, desde o ponto de origem até o ponto de consumo com o propósito de atender às exigências dos clientes.

Visto que os produtos têm um determinado ciclo de vida e que, em algum ponto não estarão mais atendendo às necessidades dos consumidores, eles precisam ser descartados adequadamente, para que, principalmente, os possíveis danos ambientais possam ser mitigados.

Diante deste cenário limitante ao ciclo de vida dos produtos, faz-se necessário pensar na logística reversa que Pereira (2012) entende como uma das áreas da logística empresarial que engloba o conceito tradicional de logística, agregando operações ligadas desde a redução de matérias-primas primárias até a destinação final correta de produtos, com o seu consecutivo reuso, reciclagem e/ou produção de energia.

Leite (2009) apresenta um fluxograma que demonstra de forma simples os canais de distribuição de produtos direta e reversamente, em que o autor aponta que bens industriais podem ser destinados a mercados secundários, sendo classificados como canais reversos de reuso. E, ao atingirem o fim da vida útil efetivo, o autor aponta os canais de revalorização desses bens que podem ser feitos através da remanufatura e da reciclagem.

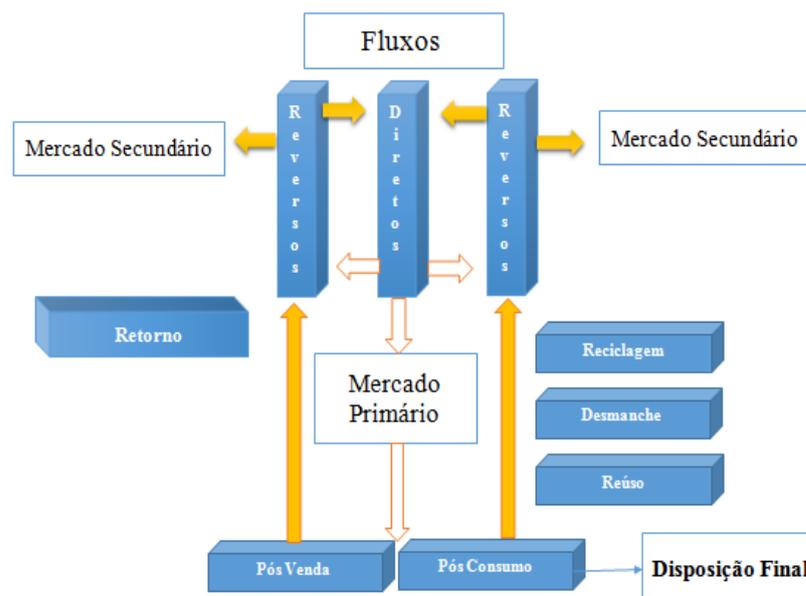
Na remanufatura, os produtos podem ter suas partes essenciais aproveitadas, substituindo componentes complementares, reconstituindo então o produto e permitindo que o mesmo possa ser devolvido ao mercado. Na reciclagem, os materiais são extraídos do produto descartado para que possam ser extraídas matérias primas secundárias, ou para que sejam reciclados e incorporados à fabricação de novos módulos.

O processo de desmanche tem papel importante na cadeia reversa, já que o mesmo permite que o produto seja desmontado e que seus componentes classificados em condições de uso sejam destinados à remanufatura ou à reciclagem.

O pós-venda, apresentado pelo autor supracitado, trata-se da área de atuação da logística reversa que equaciona e opera o fluxo físico e o de informação logística dos bens que não foram usados, ou com pouco uso, que por diversas razões, retornem à cadeia de distribuição direta, que é constituída de uma parte dos canais reversos pelos quais esses produtos fluem.

Leite (2009) finaliza o processo definindo a disposição final dos produtos como o local de destinação dos materiais e dos resíduos sem condições de revalorização. O autor aponta que, do ponto de vista ecológico, são considerados locais seguros para as disposições finais os aterros sanitários tecnicamente controlados. A figura 13 ilustra o fluxo de canais reverso, proposto pelo autor supracitado.

Figura 13 - Fluxo de canais reversos



Fonte: Adaptado de Leite (2009)

Shibao (2010) resume as atividades de logística reversa em cinco funções básicas, que são:

- a) planejamento, implantação e controle de fluxo de materiais e de informações do ponto de consumo ao ponto de origem;
- b) movimentação dos produtos na cadeia produtiva, na direção do consumidor para o produtor;
- c) busca pela melhor utilização dos recursos;
- d) recuperação do valor;
- e) segurança no destino final após utilização do produto.

O crescente aumento de módulos fotovoltaicos em território nacional tem chamado atenção. Os benefícios da fonte são indiscutíveis, todavia, ainda há pouca discussão acerca dos efeitos do acúmulo desses equipamentos, ao longo dos anos, e acerca das destinações que esses terão ao fim de suas vidas úteis.

De acordo com Fthenakis (2010), todas as etapas que aparecem na figura 14 têm entradas de materiais e de energia, e, quanto às saídas, todas possuem efluentes, sejam eles sólidos, líquidos, ou gasosos. O autor afirma que a análise do ciclo de vida desses módulos tem um papel importante na avaliação do impacto ambiental e que os resultados dessas

análises podem ser usados para tomadas de decisão de financiamentos de pesquisas e para a formulação de políticas energéticas.

Figura 14 - Fluxograma dos estágios do ciclo de vida dos módulos



Fonte: Adaptado de IRENA (2016)

Como discutido nas seções anteriores, o setor de energia solar fotovoltaica no Brasil tem se mostrado em ascensão e a quantidade de usinas, seja de pequenos projetos, como na geração distribuída, ou em grandes centrais de geração, tem aumentado. Por isso, faz-se tão importante planejar como esses equipamentos serão gerenciados quando estiverem obsoletos, buscar alternativas para a implantação de programas que estimulem a destinação correta deles, procurar as melhores soluções para a utilização dos recursos, recuperar o valor dos materiais extraídos dos módulos e dar um destino adequado para os materiais que não puderem ser mais recuperados.

Leite (2009) escreve que o tempo de retorno dos produtos transforma-se em um importante fator de atenção e que as quantidades de produtos que fluem nos canais reversos variam de acordo com o tipo, ou seja, de acordo com características como sazonalidade, obsolescência, impacto do retorno no resultado operacional, condições tecnológicas de remanufatura, dentre outras razões.

A matriz para logística reversa e para reciclagem dos módulos solares fotovoltaicos possui complexidade similar a outros produtos quando se trata de desafios operacionais para coleta dos módulos, para transporte, para descarga, para armazenagem, para criação de locais adequados para desmonte e para reciclagem. Todavia, como aponta Fthenakis (2000), esse desafio é ainda mais complexo para esse setor devido às décadas que

separam a instalação e o descarte dos equipamentos e às baixas concentrações de materiais valiosos, além da dispersão geográfica.

Embora estejam dispersos e as distâncias no território brasileiro sejam consideráveis, é possível perceber que há locais no país em que uma maior concentração de projetos pode indicar os locais que poderiam ser adequados à implantação de centros de coleta de módulos e de reciclagem. Na figura 15 são mostradas as usinas solares fotovoltaicas outorgadas pela ANEEL até o presente momento. Grande parte dessas usinas apresentadas ainda não teve a implantação ou a operação iniciada. Todavia, é preciso atentar ao fato de que todas as que estão representadas no mapa não apenas já receberam outorga da ANEEL, mas grande parte dessas usinas são grandes centrais de geração que receberão significativas quantidades de módulos fotovoltaicos para produzir a energia que habilitaram e ganharam nos leilões de energia, organizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Observando as figuras 15 e 16, pode-se perceber o que os projetos atualmente instalados no Brasil, apesar de distribuídos pelas cinco regiões, possuem maiores concentrações nas regiões Nordeste e Sudeste.

Figura 15 - Usinas fotovoltaicas outorgadas no Brasil



Fonte: SIGEL (2017)

Um dos principais custos da logística reversa, citado por Leite (2009), é o custo com transporte, que junto com os custos de armazenagem, de consolidações e de sistemas de informações, formam os custos contabilizados. O autor ainda cita os custos de gestão e os custos intangíveis que precisam ser analisados para a logística reversa dos produtos. Na gestão, entram indicadores de custos de oportunidade e de melhorias, por exemplo.

Quanto aos intangíveis, o autor supracitado menciona que há condições que não podem ser facilmente mensuradas. Essa intangibilidade dos custos poderia ser vista como aponta Shibao (2010), em relação aos custos do ponto de vista ambiental, destacando-se a importância da avaliação do impacto que um produto pode trazer ao meio ambiente durante toda a sua vida.

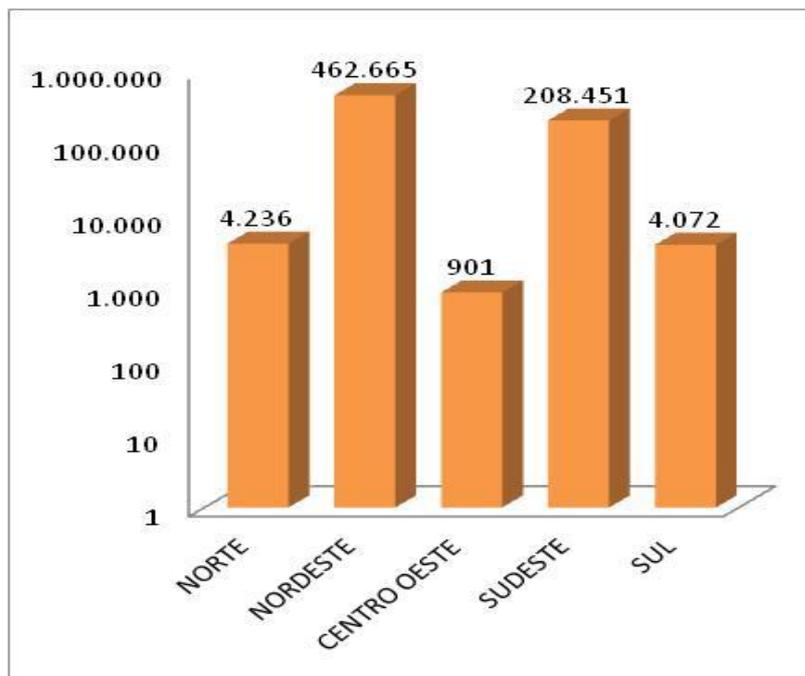
Diante dos indicativos apontados pelos autores citados da importância da localização dos pontos de coleta e de reciclagem para garantir que esse mercado seja viável, faz-se necessário observar os locais onde há maiores concentrações de projetos sendo instalados.

Do ponto de vista estratégico empresarial, Leite (2009) aponta que as decisões de logística reversa devem garantir competitividade econômica e ambiental através da diversificação da recuperação de valores financeiros.

Do ponto de vista operacional, o autor supracitado aponta que essas decisões envolvem o uso de ferramentas da logística aplicadas aos canais reversos, como as definições das redes operacionais, a localização dos pontos de origem e de destino, os modais de transporte, a armazenagem, a gestão dos estoques e os sistemas de informação.

Pensando nas decisões estratégicas e na otimização dos processos, bem como utilizando o exemplo aplicado pela União Europeia, visto na seção 5.1, implantar centros de coleta e de reciclagem nos locais próximos às grandes concentrações de usinas pode trazer vantagens competitivas e viabilizar economicamente o mercado de logística reversa e de reciclagem dos módulos.

Figura 16 – Potência instalada por região brasileira (kW)



Fonte: ANEEL (2017)

Para a geração distribuída, onde a quantidade de módulos instalados é inferior, poderiam ser criados centros de coleta e de reciclagem nas capitais: Fortaleza, Natal, Salvador, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo, Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre, que são as cidades cujos estados possuem as maiores quantidades de projetos, como é mostrado na figura 17.

Apesar de certa proximidade, especialmente entre os estados da região Sul, a implantação de centros em cada uma das capitais teria por objetivo aproximar ainda mais os centros dos consumidores, incentivando-os a procurar deixar os equipamentos obsoletos, ou danificados, sem que houvesse custos altos de transporte.

A desmontagem desses sistemas de geração distribuída deve ser feita, ou pelas empresas instaladoras dos mesmos, ou por empresas de logística reversa com profissionais capacitados para desligar os sistemas e providenciar o transporte seguro dos equipamentos até os pontos de coletas, que deverão contar com equipes capacitadas para gerir os processos de desmontagem e de reciclagem dos módulos.

Figura 17 – Possibilidades para implantações de centros de coletas e reciclagem para projetos de geração distribuída.



Fonte: SIGEL (2017)

Fthenakis (2000) indica que a coleta dos módulos desativados em grandes centrais geradoras tem se mostrado mais atrativo economicamente, visto que os custos podem ser absorvidos pelo instalador, ou capitalizados pelos proprietários. Assimilando-se a modelos já aplicados para produtos eletrônicos e de telecomunicações, esses módulos poderiam ser desmontados nas usinas e transportados aos locais de reciclagem. Estes locais, por sua vez, poderiam estar em regiões próximas às usinas para garantir a atratividade financeira.

Para as usinas de grande porte, que em média instalam projetos de 30 MW atualmente, pode-se observar na figura 15 que existe uma quantidade significativa de projetos nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais e São Paulo. Para esses locais, seria necessária a implantação de grandes centros capazes de absorver as grandes quantidades de módulos obsoletos.

O modal logístico a ser utilizado é o rodoviário, visto que as usinas de geração centralizadas do Brasil se localizam em regiões do interior dos estados e que a quantidade de módulos a ficarem obsoletos nessas usinas inviabilizaria o transporte aéreo, por exemplo. O

dimensionamento da demanda deverá seguir de acordo com a cubagem de caminhões, de modo que os custos com frete não prejudiquem a viabilidade financeira dessa logística reversa.

Figura 18 - Usinas fotovoltaicas de geração centralizada



Fonte: SIGEL (2017)

Sabe-se que produtos podem ser devolvidos por questões de qualidade, de garantia, ou por algum defeito de fabricação, ou até por avarias causadas durante transporte e estocagem. Por isso, implantar centros de coletas nos próximos anos, ainda que em escalas menores, pode ser estratégico.

Módulos com avarias podem causar prejuízos à produção de energia da usina e por isso não devem ser utilizados. Diante desta ótica e do fato de que esses poderiam ser desmontados e reciclados para fornecer aos fabricantes insumos para a produção de novos módulos com menores custos, mostra-se com mais um fato incentivador para a implementação de centros de reciclagem.

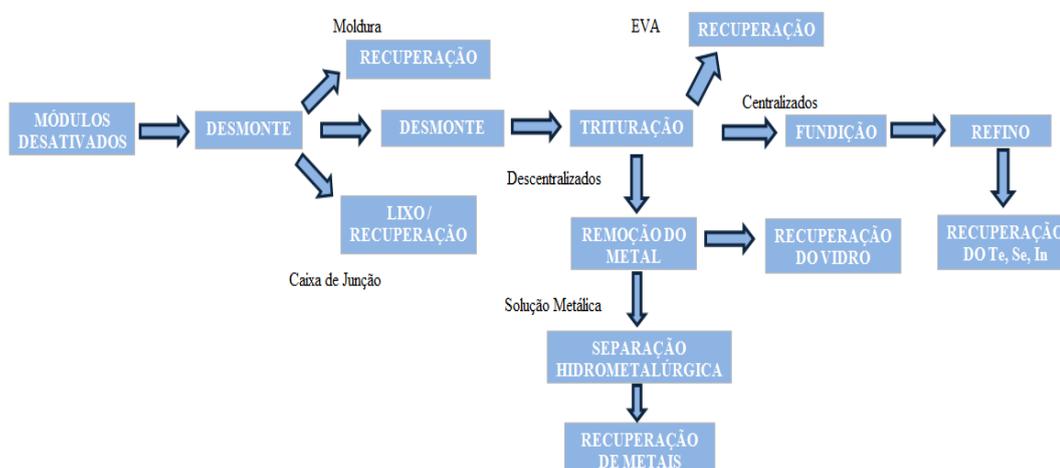
Logicamente, implantar locais como os mencionados acima não é tarefa tão simples e requer algumas estratégias. Além da determinação de locais próximos às usinas, outro fator importante está relacionado à tecnologia utilizada para a reciclagem dos módulos.

Após a coleta dos módulos, que pode ser feita tanto pelos produtores quanto por empresas de logística reversa, esses precisam ser transportados para locais onde a primeira etapa, a do desmonte dos módulos, ocorrerá. Nessa etapa, os materiais como vidro, alumínio, EVA, células de silício cristalino, metais presentes nos contatos e cabos, dentre outros, são separados e classificados quanto às condições de uso dos mesmos.

Após separação e classificação, os materiais reciclados podem ganhar novamente valor comercial, retornando à indústria solar fotovoltaica para servir de insumos para a fabricação de novos módulos, ou sendo vendidos a outras indústrias como a de vidros e a química. Isso vai depender mais das estratégias e dos acordos contratuais firmados entre fabricantes, clientes, empresas de logística reversa e de reciclagem.

O fluxo apresentado na figura 19 foi adaptado do artigo de Fthenakis (2000) que trata do gerenciamento e de reciclagem do fim da vida de módulos. Nele é possível observar as opções de reciclagem para os componentes dos módulos. A estratégia centralizada se trata da incorporação da reciclagem dos módulos obsoletos à grandes fundições que já reciclam equipamentos eletrônicos e de telecomunicação, para a recuperação de metais e de vidro. Já as operações descentralizadas podem envolver a separação de metais perigosos através de remoção química.

Figura 19 - Fluxo de opções de reciclagem de módulos



Fonte: Adaptado de Fthenakis (2000)

Um ponto interessante é que recicladores de materiais diversos, como eletrônicos, poderiam reciclar boa parte dos materiais contidos nos módulos e separar os principais materiais para poder destiná-los à mercados secundários, ou mesmo para que esses materiais pudessem ser reutilizados na fabricação de novos módulos, como é o caso da fabricante First Solar que consegue fazer a logística reversa de seus módulos de CdTe e recuperar parte dos materiais para utilizá-los na fabricação dos novos equipamentos.

A empresa supracitada desenvolveu um sistema que financia a coleta e a reciclagem de seus módulos, protegendo os usuários finais contra insolvências.

Uma das grandes questões levantadas no mercado de reciclagem se trata da viabilidade econômica desses serviços e de como eles serão pagos, ou por quem. Fthenakis (2000) aponta que esses serviços poderiam ser pagos pelo próprio gerador, ou pelo fabricante, ou ainda por fundos de custódia criados ainda no momento da compra do sistema.

Em termos de responsabilidade e de preocupação com o meio ambiente, a responsabilidade estendida do produto (EPR, sigla em inglês), em que o fabricante deve se responsabilizar pela destinação correta de seu produto após o uso, tem sido bastante discutida e aplicada, em países como os da União Europeia.

O entendimento da responsabilidade, a determinação dos modelos mais adequados a cada situação, a identificação da melhor opção para destinação dos módulos, seja remanufatura ou reciclagem, são aspectos levantados neste trabalho.

Seriam necessárias que, inicialmente, fossem implantadas regulamentações específicas para o setor, dedicando a responsabilidade de destino final ao fabricante, ou obrigando que o usuário final tomasse responsabilidade sobre o descarte correto dos módulos obsoletos. Da forma como o PNRS hoje está, a responsabilidade compartilhada por todos, acaba não recaindo sobre ninguém o real dever de destinar esses módulos no final de suas vidas.

O Brasil tem o desafio de buscar exemplos como a diretiva da União Europeia para o setor para que se criem mecanismos facilitadores de coleta, tratamento, recuperação, reciclagem e disposição desses módulos.

Para que essa cadeia de valor possa ser de fato implementada, serão necessárias ações conjuntas por parte dos agentes públicos, regulando o setor e fiscalizando-o, mas também incentivando fabricantes a utilizarem os materiais reciclados para a produção de novos módulos, criando medidas possibilitadoras e linhas de financiamento para a abertura e

ampliação de empresas de reciclagem e fazendo campanhas de conscientização do público quanto à importância de destinar corretamente esses equipamentos.

O Brasil ainda tem um mercado muito novo e a falsa percepção de que ainda faltam muitos anos até que esses problemas ambientais comecem a causar impactos, trazendo perigos que podem prejudicar a preparação desse mercado de reciclagem. Adotar tecnologias e processos adequados para garantir a segurança da reciclagem, a gestão dos resíduos restantes, a logística reversa desses equipamentos e para determinar quem são os verdadeiros responsáveis pela destinação correta desses módulos, não pode ser deixada para depois.

7. CONCLUSÃO

A energia solar fotovoltaica tem se mostrado não apenas uma tecnologia sustentável, mas economicamente atrativa. No Brasil, as características naturais propícias à geração de energia elétrica a partir da luz solar, os incentivos públicos que vêm sendo aplicados nos últimos cinco anos, as novas regras de inserção da energia gerada por consumidores independentes na rede e o potencial de mercado fizeram com que o mercado de energia solar fotovoltaica ganhasse proporções enormes e se apresentasse com grandes perspectivas de crescimento.

Como discutido neste trabalho, o crescimento da geração de energia elétrica, a partir da fonte solar, traz consigo o crescimento da implantação de módulos solares fotovoltaicos. Sabe-se que medidas preventivas para que os impactos ambientais causados pela fabricação de módulos e pela implantação de usinas solares já são reconhecidas e tomadas pelo público local, ainda que este seja um mercado novo no país. Todavia, há uma necessidade real de que se construa uma cadeia de valor para lidar com módulos danificados e obsoletos, para que estes não venham a se tornar prejuízos ambientais futuros e acabar prejudicando a sustentabilidade da fonte.

Com base nos dados apresentados, sabe-se que nos próximos trinta anos, a quantidade de módulos que precisará ser substituída representa um peso aproximado de 300 mil toneladas.

Este material, todavia, com a criação de regulamentações e leis públicas que determinem a responsabilidade da destinação final, com o incentivo à criação de postos de coleta e de reciclagem em locais estratégicos que viabilizem esse novo mercado, não precisa

se tornar um dano ambiental grave. Este material pode criar uma nova cadeia de valor, gerando matéria prima para fabricação de novos módulos, gerando insumos para indústrias, como a de vidro e criando novas oportunidades na economia do país.

O Brasil já tem sua matriz energética dominada por fontes renováveis e tem leis e diretrizes ambientais rigorosas que protegem a fauna e a flora, exigindo que investidores tomem as devidas precauções para minimizar, ou evitar, os impactos ambientais que seus empreendimentos venham causar. Todavia, apesar de ter um programa que distribua entre todas as partes, a responsabilidade sobre os resíduos gerados ainda precisa criar diretrizes específicas que, como na União Europeia, tratam dos módulos solares fotovoltaicos instalados em seu território.

Concluindo, portanto, que a criação de centros de coleta e reciclagem nas proximidades dos locais de maiores concentrações de projetos instalados e a serem instalados, pode reduzir os custos de logística reversa e incentivar essa prática, garantindo um futuro sustentável para a fonte e a criação de uma importante cadeia de valor para gerar empregos, rendas e desenvolvimento tecnológico no país.

8. REFERÊNCIAS

- **ABNT NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- ANEEL (Comp.). **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 11 dez. 2017.
- ASSUNÇÃO, Hélio Delgao. **DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO INSTALADOS NO DEE - UFC**. 2014. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- BRASIL. Lei nº 6936, de 31 de agosto de 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília.
- BRASIL. Decreto nº 99274, de 1990. **Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e Sobre A Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília.
- BRASIL. Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília.

- BELTRÃO, Ricardo E. de A. **Efeito da Temperatura na Geração de Energia de Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Condições Climáticas Distintas. Estudo de Caso para as Localidades de Recife e Araripina.** 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado).
- BOYLESTAD, Robert L. **Electronic Devices and Circuit Theory/** Louis Nashelsky – New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- CANADIAN SOLAR, Folha de Dados **CS6X.** Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com/solar-panels/maxpower.html>>. Acesso em: 02 maio 2016.
- CARVALHO, Leandro Rocha de. **ENERGIA SOLAR COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA NO MANEJO DE BOVINO DE LEITE EM REGIME INTENSIVO.** 2014. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação Latu Sensu em Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- Curso de Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- DAS CHAGAS MARQUES, Francisco. **Minicurso de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos.** Campinas: [s.n.], 2014. 61 p. Disponível em: <<http://www.iei-brasil.org/pdf/4inovafvminicursofrancisco.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2017.
- END-OF-LIFE management: Solar Photovoltaic Panels. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>>. Acesso em: 03 ago. 2017.
- EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: IMPACTOS AMBIENTAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS. Florinópolis: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3467/2519>. Acesso em: 24 jul. 2017.
- FTHENAKIS, V., **End-of-Life Management and Recycling of PV Modules,** Elsevier, 2000.
- FTHENAKIS, V.; TURNEY, D.. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. **Elsevier.** Upton, p. 3261-3270. abr. 2011.
- FTHENAKIS, V.m.; KIM, H.c.. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Elsevier.** New York, p. 1609-1628. fev. 2010.
- GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. D. **Solar cell efficiency table (version 48). Progress in Photovoltaics: Research and Applications,** v. 24, 2016.p. 905-913.

- HERNANDEZ, R.r. et al. Environmental impacts of utility - scale solar energy. **Elsevier**. Stanford, p. 766-779. set. 2013.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Org.). **Key world energy statistics**. Paris: IEA, 2017. 97 p.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Org.). **Next Generation Wind and Solar Power**. Paris: IEA, 2016. 182 p.
- J.M.PEARCE; MCDONALD, Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. **Energy Policy**. Ontario, p. 7041-7047. ago. 2010.
- KANNAN, R. et al. Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. **Elsevier**. Singapura, p. 555-563. maio 2005.
- KICHOI, Jun -; FTHENAKIS, Vasilis. Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure. **Environmental Science & Technology**. New York, p. 8678-8683. maio 2010.
- LEITE, Paulo Roberto. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 240 p.
- LISA KRUEGER. Vice President (Comp.). **First Solar's Module Collection and Recycling Program**. First Solar, 2010. 27 slides;
- LOGISTICS PLUS. **SOLAR INDUSTRY LOGISTICS PROJECT**: Erie: Lp, 2015. Color.
- MAURICIO T. TOLMASQUIM (Brasil). Coordenador (Org.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Epe, 2016. 452 p.
- MILES, R.w.; HYNES, K.m.; FORBES, I.. Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. **Elsevier**. Newcastle, p. 1-42. 2005.
- MOREIRA, Fabiano Greter; BONFIM, Edmar. A LOGÍSTICA REVERSA COMO GESTÃO SUSTENTÁVEL NAS ORGANIZAÇÕES. **Pitágoras**, Andradina, mar. 2013.
- NAKABAYASHI, Rennyo Kunizo. **MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL: CONDIÇÕES ATUAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- PEREIRA, André Luiz et al. **Logística reversa e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 192 p.
- PHYLIPSEN, G.j.m.; ANSELMA, E.a.. **Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules**. Utrecht: Novem, 1995. 66 p.

- PINHO, João Tavares. **Manual de Engenharia Sistemas Fotovoltaicos/** Marco Antonio Galdino – Rio de Janeiro, 2014.
- PRATA, B. A. ; MAIA, G. L. **A Logística Reversa nas áreas urbanas.** In: PRATA, B.A.; OLIVEIRA, L.K.; DUTRA, N.G.S.; PEREIRA NETO, W. A.(Org.). Logística Urbana: Fundamentos e Aplicações. Curitiba: CRV, 2012, v , p. 199-226.
- PV CYCLE. **Annual Report 2016.** Disponível em: <<http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2017/08/2016-Annual-Report-PV-CYCLE-AISBL.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2017.
- REVIEW 2016, **BP Statistical Review of World Energy June 2016.** Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.
- SHIBAO, Fábio Ytoshi; MOORI, Roberto Giro; SANTOS, Mario Roberto dos. **A logística reversa e a sustentabilidade empresarial.** In: **SEMEAD SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO**, 2010.
- SOLAR, Canadian. **Warranty PV Module Canadian Solar.** Canadian Solar, 2015.
- SOLAR Energy Isn't Always as Green as You Think. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/solar-energy-isnt-always-as-green-as-you-think>>. Acesso em: 02 jun. 2017.
- TAMIZHMANI, G.; TANG, Y.; PETACCI, L., **Photovoltaic Module Thermar/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Devevelopment for Energy Rating.** Arizona State University East – National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- TORRES-SIBILLE, Ana del Carmen et al. Aesthetic impact assessment of solar power plants: An objective and a subjective approach. **Elsevier.** Valencia, mar. 2008.
- VARGAS PINTO, Luiz Antonio. **Eletrônica de junção.** Disponível em: <<http://www.vargasp.com/download/livros/Transistor04.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2017.
- YU, Suiran; TAO, Jing. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. **Solmat.** Shanghai, p. 108-124. maio 2015.