

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

GESTÃO DO FIM DE VIDA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS¹

ROSANA TEIXEIRA MIRANDA², FRANCIELLE DA SILVA LEANDRO² & TATIANE
CAETANO SILVA²

¹Publicado no Ano de 2019;

²Universidade Federal de Itajubá- UNIFEI, rosana_miranda@hotmail.com.

Resumo

A inclusão da energia solar fotovoltaica na matriz energética é vista como uma ação positiva em substituição às fontes fósseis. Contudo, a promoção desta fonte de energia deve ser analisada pensando nos impactos ambientais que os sistemas fotovoltaicos trarão quando alcançarem o término de sua vida útil. Com a expectativa de vida útil entre 25 e 30 anos, nos próximos anos é esperado que grande quantidade de módulos seja descartada. No Brasil, os módulos se enquadram hoje como lixo eletrônico. O descarte e a disposição desses resíduos em aterros podem se tornar um sério problema. Assim, a correta gestão do fim de vida reduziria o impacto ambiental, além de possibilitar a recuperação de matérias primas importantes que podem retornar ao ciclo produtivo de novos sistemas. Este artigo abordará como alguns países e o Brasil estão se preparando para lidar com este problema e apresentará também algumas regulamentações e estratégias já em andamento em relação à gestão do fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos.

Palavras chave: energia renovável, reciclagem, resíduo eletrônico.

Abstract

The inclusion of photovoltaic solar energy in the energy matrix is seen as a positive action in place of fossil sources. However the promotion of this energy source should be analyzed considering the environmental impacts that the PV systems will bring when they reach the end of their useful life. Since the lifetime of these systems is between 25 and 30 years, in the coming years it is expected that a large number of modules will be discarded. In Brazil, the panels are today classified as electrical-electronic equipment. The disposing of the waste from these systems in landfills can become a serious problem. Thus, the correct end-of-life management would reduce the environmental impact, as well as enable the recovery of important raw materials that can return to the productive cycle of new systems. This article will discuss how some countries and Brazil are preparing to deal with this problem and will also present some already existing regulations and strategies for dealing with end of life management of photovoltaic modules.

Keywords: renewable energy, recycling, electronic waste.

1. INTRODUÇÃO

As necessidades do mundo em buscar outras fontes de energia, sobretudo aquelas renováveis, encorajam o crescimento do uso da energia fotovoltaica. No final de 2016, o mundo já contava com um total acumulado de potência instalada de energia FV na ordem de 303 GW e a previsão é de 2030 com quase 2.000 GW e 2050 com 4.500 GW (IEA-PVPS, 2018).

No Brasil o crescimento ainda é modesto e impactado pelo alto preço para implantação dos sistemas que depende do mercado externo. O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de silício, porém não existe no país a purificação do silício até o grau solar em nível comercial. As empresas existentes estão envolvidas apenas nas extremidades da cadeia produtiva, ou seja, na produção de silício metalúrgico e na montagem do módulo, não conseguindo desenvolver a produção doméstica dos módulos em escala competitiva. Tecnologias existentes no mercado global precisam ser ajustadas às características do mercado brasileiro, em especial, às altas temperaturas que ocorrem na maior parte das áreas de elevada irradiação solar (Abinee, 2012).

Contudo há fatores para a promoção da energia solar no Brasil. Um deles é o potencial brasileiro de aproveitamento solar, aliado ao atual risco de escassez de energia elétrica. A matriz elétrica, baseada em grandes usinas hidrelétricas e termelétricas, serve de grande motivação para o uso das alternativas energéticas renováveis. A existência de algumas políticas e programas dos governos para a geração de energia, com base nas fontes renováveis, estimula em especial o uso da energia solar fotovoltaica (FV). Outro fator ainda é o movimento no mercado internacional de avanço nas tecnologias, com melhoria da eficiência e a redução nos custos de implantação dos sistemas FV.

Embora tenha ocorrido o cancelamento do leilão de energias renováveis (2º LER – 19/12/2016 -MME), onde seriam negociados contratos de energia de reserva (CER) para empreendimentos de fontes solar FV, a expectativa ainda é de crescimento a taxas elevadas no país nos próximos anos. A geração de energia elétrica FV alcançará 7.000 MW, cerca de 1% do total da matriz energética brasileira, conforme expectativa relatada no Plano Decenal de Energia Elétrica - PDE 2026 (MME/EPE, 2017).

Diante deste cenário de crescimento, cabe avaliar os possíveis impactos do uso desta fonte. Como todo empreendimento gerador de energia elétrica, as usinas solares também apresentam diversos impactos em todo o seu ciclo de vida, em variadas amplitudes e abrangências. Enquanto os benefícios do uso da energia solar como uma energia limpa, o descarte sem controle destes sistemas no final de vida útil pode ter efeitos contrários.

As previsões mostram que o fluxo de resíduos de células fotovoltaicas nos próximos anos irá aumentar acentuadamente. Este assunto já foi tratado em alguns países que passaram a gerir eficazmente o final de vida destes módulos. Na União Européia, por exemplo, os módulos FV foram incluídos em uma diretiva de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, que estabelece obrigações legais que as empresas devem respeitar, quando se trata de coleta e reciclagem dos mesmos (EU – European Union - Directive 2012/19). No Brasil, a classificação dos resíduos de equipamento elétricos e eletrônico (REEE) deve ser feita segundo a norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), referente à classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente. Também no âmbito federal, a lei 12.305 de 02/08/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil. PNRS, 2010) e classifica os resíduos quanto à origem e quanto à periculosidade. Porém nenhuma norma ou lei atualmente vigente no país especifica claramente o enquadramento dos resíduos tecnológicos quanto à sua origem, natureza e periculosidade, incluindo aí os sistemas FV.

O objetivo principal deste trabalho será destacar a importância da gestão do fim de vida dos módulos FV de forma a reduzir os impactos causados ao ambiente e apresentar alguns projetos, regulamentações e leis já implementadas. Ao longo do trabalho, será dado um panorama do uso da fonte e dos principais incentivos para adoção da energia FV e serão apresentadas algumas práticas que podem servir de orientação para formulação de políticas de regulamentação no Brasil.

2. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DA ENERGIA FV

O silício (Si) é o principal material na fabricação das células FV e se constitui como o segundo elemento químico mais abundante na terra. As tecnologias de células FV comercializadas atualmente, segundo Ruther (2004), são:

- Silício Cristalino (módulos de primeira geração): monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) e *string ribbon*, que representam 85% do mercado por possuir melhor eficiência;
- Filmes finos (módulos de segunda geração): constituem em deposição de camadas finas de materiais semicondutores FV que podem ser de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Possuem menor eficiência e a participação no mercado está entre 10 e 15% por competir com a tecnologia do silício.

Existe também a tecnologia de concentração solar, porém ainda em P&D e com participação de menos de 1%. As células FV para concentração (CPV – *concentred photovoltaics*) demonstrou ter alta eficiência, porém seu custo ainda não é competitivo (GALDINO; PINHO, 2014).

Os sistemas FV podem ser conectados ou não conectados à rede elétrica. No caso de conectados à rede elétrica é necessária a instalação de um inversor para transformar a energia gerada DC do sistema solar para energia AC. O fator de eficiência geralmente destes inversores está na faixa de 95 a 99%, sendo 94% a eficiência mínima aceitável. Estas pequenas centrais de distribuição, após aprovação pelo operador, podem ser conectadas à rede de distribuição (IEA-PVPS, 2016). Já para os sistemas não conectados à rede elétrica uma bateria para estocar energia é necessária para prover energia durante os períodos em que o sistema FV não estiver fornecendo. Quanto às aplicações e segmentos do mercado, o relatório da Agencia Internacional de Energia (IEA-PVPS, 2016), relaciona seis tipos:

- Sistema pico PV: são pequenos kits, módulos (pouco watts), usados principalmente em países desenvolvidos, em sistemas não conectados para prover serviços essenciais como iluminação e alimentação para carga de telefones, rádio e computadores.
- Sistemas domésticos isolados: fornecem energia para uso doméstico onde não provem de rede de eletricidade. Geralmente estes sistemas atendem às comunidades isoladas, fornecendo eletricidade, na maior parte dos casos, para iluminação, refrigeração e outras cargas baixas de energia.
- Sistemas não domésticos isolados: os sistemas FV não domésticos isolados foram as primeiras aplicações comerciais para sistemas terrestres. Seu uso abrange um amplo range de aplicações, tais como em telecomunicação, refrigeração de medicamentos e vacinas em postos de saúde, bombeamento de água e outros.
- Sistemas híbridos: combina as tecnologias do uso de geradores e sistema FV. Geralmente usadas para estações radio base em telecomunicações, eletrificação em comunidades remotas.
- Sistemas FV distribuídos conectados à rede elétrica: são instalados para fornecer energia ao consumidor, estando este também conectado a rede elétrica da distribuidora para complementar a quantidade de energia demandada. O consumidor pode também nos casos em que gerar mais energia que a utilizada, injetar esta energia excedente na rede distribuidora.
- Sistemas FV centralizados conectados à rede elétrica: exercem a função de estações de energia. A fonte de alimentação por tal sistema não é associada a um cliente particular. Estes sistemas são tipicamente instalados em terrenos ou campos e funcionam normalmente a certa distância do ponto de consumo.

3. PROGRAMAS E LEIS DE INCENTIVOS PARA ADOÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

Acompanhando o expressivo crescimento do setor FV no mundo, o Brasil vem buscando enfrentar os desafios e criando oportunidades para a inserção desta fonte na matriz energética nacional. Em 2012 foi estabelecida, através da resolução normativa 482 da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), a permissão da conexão de sistemas de geração de energia provenientes de fontes de renováveis à rede e criou o sistema de

compensação de créditos de energia, ficando estabelecido um marco para uso da energia FV. Na sequência, outras medidas que, direta ou indiretamente beneficiaram o mercado FV:

- Resolução normativa 687/2015 da ANEEL, revisando a resolução normativa 482/2012, que começou a valer em 1º de março de 2016, estabeleceu critérios de acesso a microgeração (potência instalada até 75 KW) e minigeração distribuída (potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW). Nos casos em que a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor passou a ter o prazo 60 meses (anterior era 36 meses) para que possa utilizar os créditos para diminuir a fatura com a distribuidora.
- Lei 20.849/2013 do estado de Minas Gerais, que incentiva o uso da energia solar e tem por objetivo aumentar a participação da energia solar na matriz energética do estado, estimulando o uso para a eletrificação de localidades distantes de redes de distribuição de energia elétrica, para a melhoria das condições de vida de famílias de baixa renda, para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e para a redução das áreas a serem alagadas para a geração de energia elétrica, além de reduzir a demanda de energia elétrica em horários de pico de consumo.
- Decreto 46.296/2013 do governo de Minas Gerais que dispõe sobre o Programa Mineiro de Energia Renovável - Energias de Minas e prevê a concessão de incentivos fiscais e tratamento tributário diferenciado, incentivando a produção e uso de energia renovável, dando tratamento prioritário a estes empreendimentos nas solicitações de acesso ao sistema, nos processos de regulação ambiental e na celebração de contratos de compra de energia.
- Resolução Normativa 77/2004 da ANEEL que estabeleceu procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos com base em fonte solar, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30 MW.
- Resolução Normativa 247/2006 da ANEEL que estabeleceu as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências.
- Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia (MME, 2015) para ampliar e aprofundar

as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia e em especial a solar FV.

Outro comportamento também que pode beneficiar o mercado de FV é a migração de consumidores para o mercado livre de energia. O aumento na tarifa da energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), entre outros fatores, vem impulsionando o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Em 2016 a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2016) registrou um aumento em relação a 2015 de 25 vezes no número de pedidos aprovados de adesão de consumidores. Grande parte da adesão é de consumidores especiais, aqueles com demanda entre 0,5 MW e 3MW e que são obrigadas a adquirir energia de PCH (pequenas centrais hidrelétricas) ou de fontes incentivadas especiais tais como a solar FV.

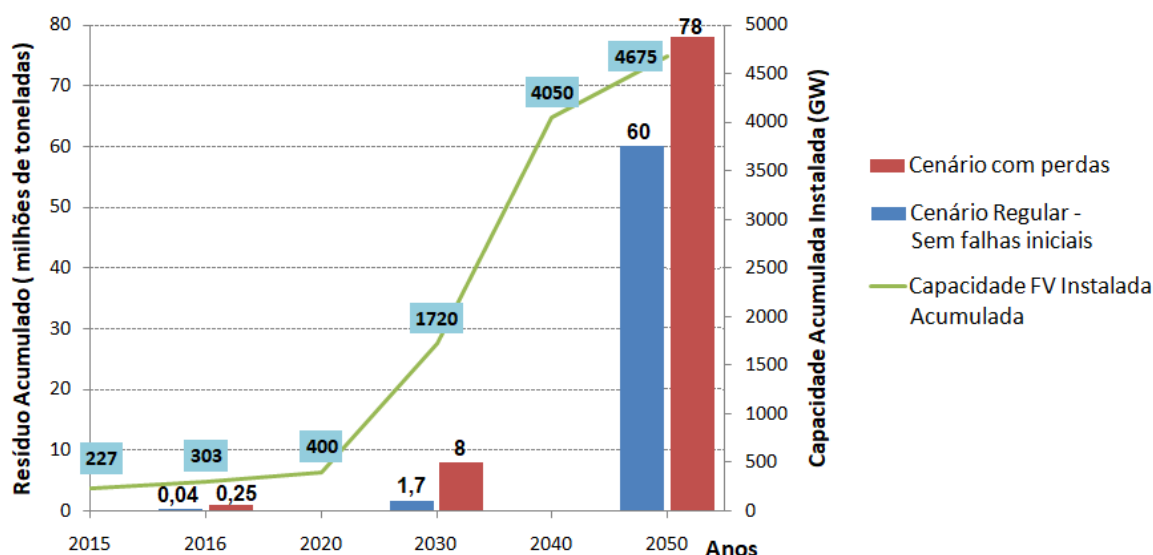
4. O PROBLEMA DA GESTÃO DO FIM DE VIDA DOS MÓDULOS SOLARES FV

Com o crescimento do uso de sistemas FV, espera-se que o volume de descomissionamento também cresça. A expectativa de vida útil dos módulos é da ordem de 25 a 30 anos, dependendo das condições e regime de operação. Entretanto, é observado no mercado que alguns sistemas são descartados mais cedo que esta expectativa devido a danos que ocorrem no transporte e na fase de instalação e de falhas que ocorrem logo no início da operação do sistema (IEA-PVPS, 2018). Vale ressaltar que outros componentes dos sistemas FV, que não serão abordados, possuem expectativa de vida útil ainda menor. Geralmente as baterias de chumbo de sistemas *off grid* tem expectativa de vida útil entre 5 a 10 anos e os inversores de sistemas *on grid* tem vida útil de 15 anos. As primeiras instalações FV ocorreram por volta de 1990, logo é esperado que o descomissionamento se torne gradualmente maior a partir dos próximos anos e o descarte destes sistemas no fim de vida será um desafio global. Estima-se que atualmente a taxa de resíduo gerado é da ordem de entre 0,1% a 0,6% do total de sistemas instalados em toneladas. A partir de 2030 é estimado que esta taxa cresça entre 4% a 14% e que em 2050 alcance 80% (IRENA e IEA-PVPS, 2016; IEA-PVPS, 2018).

A figura 1 apresenta a projeção estimada global do descarte de sistemas (em toneladas) para os anos de 2016, 2030 e 2050 a partir de dados da capacidade instalada acumulada e da previsão de aumento nos próximos anos (em GW) de acordo com o relatório da Agencia Internacional de Energia (IRENA e IEA-PVPS, 2016; IEA-PVPS, 2018), que trabalhou com dois cenários. O cenário regular assume o descarte após o termino da vida útil. Nesse cenário o volume seria de 43.500 toneladas no final de 2016, com aumento projetado

para 2030 de 1,7 milhões de toneladas e de 60 milhões de toneladas em 2050. Já no cenário com perdas, é admitido também falhas e descarte antes do fim de vida. Nesse cenário a projeção é de 250.000 toneladas para o final de 2016, crescendo para 8 milhões de toneladas em 2030, chegando em 2050 com 78 milhões de toneladas. Nos dois cenários há um crescimento em 2030 que é quando se espera um maior número de sistemas sejam descomissionados. Já em 2050 é possível perceber que a capacidade instalada aumenta drasticamente, assim como as quantidades de resíduos nos dois cenários, diante da expectativa de grande capacidade de penetração no mercado energético das tecnologias FV.

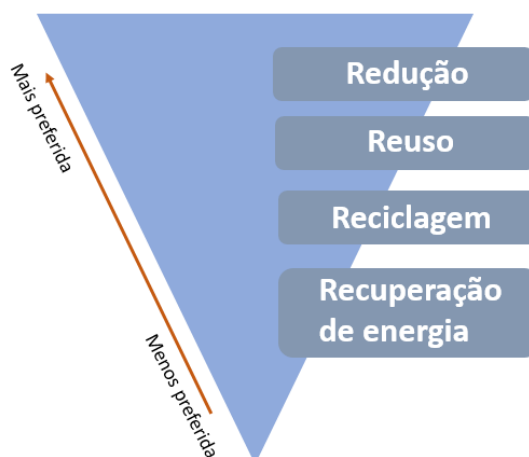
Figura 1 – Projeção GW instalados e toneladas de módulos descartados



Fonte: Adaptado IRENA e IEA-PVPS (2016).

A partir da expectativa dos volumes gerados de descarte, torna-se evidente a necessidade de discutir a gestão de fim de vida dos módulos FV. Diversos estudos examinam a necessidade de uma eficiente gestão no fim de vida útil dos módulos FV (Choi e Fthenakis, 2014). Seja por razões econômicas, sustentáveis ou para adequação a legislações ambientais, que regulamenta o descarte de resíduos perigosos, os módulos fotovoltaicos no final de sua vida não podem ser vistos apenas como uma quantidade de resíduo inútil que deve ser descartada. Ao contrário, estes resíduos apresentam recursos interessantes de materiais que podem ter diversos destinos e usos de várias maneiras. A gestão de fim de vida pode ser uma oportunidade para criação de valor na cadeia de produção de módulos FV. A figura 2 mostra as diferentes estratégias de fim de vida para os módulos FV. Basicamente essas estratégias adotam o princípio dos 4R's (redução, reuso, reciclagem e recuperação).

Figura 2 - Gestão do fim de vida de módulos FV baseada no princípio 4R's.



Fonte: Adaptado de IRENA e IEA-PVPS (2016).

A primeira estratégia e a que deve ser preferida é a da redução do uso de materiais na fabricação dos módulos FV. Os módulos fotovoltaicos possuem metais em sua composição que contém substâncias perigosas. O chumbo, por exemplo, é um metal pesado com um alto potencial de acumulação no sistema humano e no meio ambiente. Metais raros, como a prata, embora representem menos de 1% da massa total do módulo o seu uso em módulos pode contribuir para a escassez do recurso. Desta forma a redução deve ocorrer preferencialmente durante a fase de produção e envolve considerável pesquisa para desenvolvimento de novas tecnologias para a substituição de materiais.

A segunda estratégia é o reuso que envolve a recuperação de sistemas (*retrofit* e remodelagem) ou parte dos componentes dos módulos FV no fim de vida. De acordo com IRENA e IEA-PVPS (2016), muitos sistemas continuam intactos mesmo após expectativa média de fim de vida que é de 30 anos. Falhas prematuras durante a vida útil dos módulos podem ser reparadas e os módulos recuperados para reuso. Nesse caminho, no exterior já começa a estabelecer a comercialização de sistemas FV usados, como os casos das plataformas alemãs Secondsol (www.secondsol.de) e PVXchange (www.pvXchange.com). Nessa estratégia, os módulos que não podem ser reparados ou reusados seguem para o tratamento e reciclagem dos resíduos.

A reciclagem de materiais, próxima estratégia, vem sendo motivo de pesquisas e diferentes tecnologias são encontradas na literatura, sendo que algumas já se encontram em práticas comercialmente. Os módulos em sua produção utilizam materiais que contêm

substâncias tóxicas e metais raros que não podem ser simplesmente depositados em aterro. A tabela 1 apresenta os principais materiais e o total de energia que são consumidos na produção de um típico módulo da tecnologia silício cristalino (c-Si), com 36 células de 12,5 cm x 12,5 cm², área de superfície de 0,65 m² e eficiência de 16.

Tabela 1 - Banco de dados de inventário dos principais materiais para produção de um módulo fotovoltaico.

Materiais	g / module
Cobre	18,00
Vidro temperado	4.700,00
Tedlar / Al / Tedlar	91,00
Al em Tedlar	0,09
Poliéster	440,00
Adesivo de silicone	39,00
Al (quadro)	1.200,00
EVA	669,00
sog-Si (silício grau solar)	576,00
Resíduo célula c-Si	1,08
Al-Ag contatos elétricos	28,08
Ag contatos elétricos	3,60
Consumo de energia	kWh / module
Eletricidade	48,70
Calor	61,17

Fonte: Stopatto 2008.

A reciclagem dos módulos FV conseguiria recuperar grande parte desses materiais quando os módulos alcançarem o final de vida. É possível alcançar uma taxa de recuperação maior que 90% dos componentes principais dos módulos, sendo que parte do material reciclado, como o caso do silício, pode ser utilizada para produção de novas células FV (PVCycle, 2018). A energia consumida na produção de módulos a partir de materiais reciclados é 30% da energia requerida quando esses módulos são fabricados a partir da matéria prima extraída (Wambach; Alsema, 2006). Desta forma a reciclagem reduz grande parte do impacto ambiental da fase de produção.

A quarta estratégia considera a recuperação de energia a partir do aproveitamento energético do tratamento dos resíduos dos módulos FV pelo processo de incineração. Nesse processo o calor gerado pela queima dos resíduos não perigosos pode ser utilizado para geração de energia elétrica por exemplo.

A reciclagem e a recuperação de energia são alternativas que além de prevenirem impactos ao meio ambiente, podem contribuir para a redução do consumo de energia na fase de fabricação e conseqüentemente do preço médio dos módulos fotovoltaicos conforme alguns resultados alcançados em literaturas disponíveis. (European Commission DG ENV, 2011; Cucchiella et al., 2015).

O descarte dos materiais que compõem os módulos FV e de seus principais componentes (baterias, inversores, por exemplo) em aterros ou incineração claramente não é a melhor opção e devem ser evitada como prática de gestão de fim de vida. As células fotovoltaicas contêm materiais perigosos, como cádmio e chumbo que devem ser recolhidos e tratados de forma especial, a fim de minimizar os efeitos negativos no ambiente e nos seres humanos (Fthenakis, 2000). O elevado custo para remover estes materiais dos aterros anularia os benefícios de toda a economia que a energia gerou ao longo de sua vida útil. A ideia é que a energia FV seja uma fonte de energia limpa e renovável. Desta forma não faz sentido fazer o descarte dos equipamentos de qualquer forma. Os metais pesados, tóxicos e outras substâncias perigosas presentes nos módulos provocam potencialmente danos ao meio ambiente. Ainda que em pequenas quantidades na composição dos módulos, a quantidade excede o limite dos níveis para disposição em aterros comuns (European Commission DG ENV, 2011).

Vale ressaltar que a opção por não adotar nenhuma das alternativas apresentadas implica em falta de gestão e controle dos resíduos, com o risco destes materiais irem para lixões ou serem embarcados ilegalmente para países subdesenvolvidos. Uma apropriada gestão de fim de vida dos módulos FV oferece uma solução sustentável. Obviamente a viabilidade técnica, econômica, e principalmente os benefícios ambientais de cada estratégia precisarão ser analisados, podendo ser objeto de estudos e pesquisas futuras.

5. ABORDAGENS DE GESTÃO DO FIM DE VIDA NO BRASIL E MUNDO

No Brasil, embora não exista lei ou regulamentação específica, o que se percebe é que atualmente os módulos FV são classificados como equipamento elétrico-eletrônico, sendo que a gestão do fim de vida segue as regras de disposição dos resíduos de equipamentos elétrico-eletrônicos (REEE). Entretanto o enquadramento deste tipo de resíduo quanto à sua

origem, natureza e periculosidade já é bastante complicada em se tratando apenas de equipamento elétrico-eletrônico.

Com o intuito de viabilizar uma melhor gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, a instrução normativa 13 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2012) contém uma lista dos resíduos. Os equipamentos eletrônicos são identificados e considerados perigosos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12.305/2010, que regulamenta o tratamento adequado para o resíduo sólido em geral, é aplicada para a gestão do REEE (Brasil, 2010). Pelo seu art. 30 é instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Pelo artigo 33 da Lei, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos, deverão estruturar e implementar sistemas de logística reversa, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para o retorno dos produtos e embalagens após o uso pelo consumidor.

Durante a pesquisa verificou-se que de uma forma geral, a fiscalização para REEE ainda é falha e o processo de logística reverso ainda não é objeto de controle e fiscalização, a não ser para os pneus e as embalagens de agrotóxicos. O mais próximo de ser mais esclarecedor foi encontrado na proposta de regulamentação do REEE, elaborada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, dentro do grupo de trabalho estabelecido (CONAMA, 2010).

Na União Européia a diretiva 2012/19/EU (2012) que trata o descarte de lixo eletrônico WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) foi publicada, tendo como objetivo a prevenção e a reciclagem do lixo eletrônico. O quadro 1 apresenta as principais alterações e metas segundo Diretiva 2012/19/EU. Os módulos FV fazem parte do escopo desta, estando claramente relacionado no anexo 1 item 4 da diretiva que trata ainda da responsabilidade estendida ao fabricante (EPR – extended producer responsibility). A partir de Fevereiro de 2014 a diretiva entrou em vigor e todos os países membros da União Européia deve ter lei que regulamenta a coleta, transporte e tratamento de módulos FV no fim de vida, como responsabilidade do fabricante. Onde quer que o fabricante esteja instalado, será responsável pelo fim de vida dos módulos e de custear a sua coleta e reciclagem dentro do mercado europeu. A inclusão dos módulos FV na WEEE estabelece requisitos para garantir a coleta e reciclagem dos painéis de fim de vida útil. (Choi e Fthenakis, 2014).

Quadro 1 – Principais alterações e metas

	Diretiva 2012/19/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 Julho	Data de entrada em vigor das alterações
Âmbito de aplicação	EEE passam a incluir os painéis fotovoltaicos	No limite, a partir de Fevereiro 2014 (data limite de transposição da Diretiva EU para o direito interno)
	EEE passam a ser classificados em seis categorias (Anexo III)	A partir de 15-08-2015
Taxa de recolha ⁽¹⁾	4 kg/ habitante, por ano, de REEE provenientes de particulares.	Até 31-12-2015
	45% do peso médio dos EEE colocados no mercado, nos três anos anteriores, de REEE de proveniência particular e não particular	Entre 2016 e 2019
	85% REEE gerados ou, uma taxa de recolha de 65% do peso médio dos EEE colocados no mercado, nos três anos anteriores de REEE de proveniência particular e não particular	A partir de 2019
Objetivos de reciclagem e valorização ⁽²⁾	Aumento em 5% dos objetivos de valorização e reciclagem, estabelecidos na anterior Diretiva, tendo por base o peso de REEE que entram nas instalações de valorização ou de reciclagem / preparação para a reutilização, após terem sido devidamente tratados	A partir de 15 Agosto de 2015

Fonte: Adaptado de Diretiva 2012/19/EU

Alemanha e Reino Unido parecem estar mais adiantados em ações para o tratamento de módulos FV danificados ao longo do uso e no fim de vida. Estes países transformaram em lei a diretiva da União Europeia.

Na Alemanha a regulamentação existente, que já era originalmente baseada na diretiva da UE de descarte do lixo eletrônico, foi alterada e entrou em vigor em 24 de Outubro de 2015, pela lei de equipamentos elétricos e eletrônicos (ElektroG, 2015). Assim, desde 1 de Fevereiro de 2016, os fabricantes e fornecedores de módulos FV devem ser registrados pela ElektroG, antes de serem oferecidos ou vendidos na Alemanha. No fim de vida os módulos devem ser recolhidos pelos fabricantes para tratamento e reciclagem. Os municípios podem retirar estes módulos e são ressarcidos pelos fabricantes. Já aparecem empresas que fazem esta logística a custo menor para os fabricantes e também as soluções de reciclagem. É esperado que a Alemanha seja um grande mercado de tecnologias de reciclagem de módulos FV.

Da mesma forma da Alemanha, no Reino Unido a lei No. 3113 (UK, 2013), de 1 de Janeiro de 2014, também incorpora as alterações da diretiva da EU e inclui no seu escopo os

módulos FV e a responsabilidades de gestão de fim de vida dos módulos pelos fabricantes e fornecedores.

Japão e Estados Unidos, embora sejam mercado avançados e que possuam tecnologia para reciclagem de módulos FV, não possuem regulamentação específica e aplicam regulamentação geral de gestão resíduo. No Japão foi publicado em abril de 2016 pelo Ministério do Ambiente japonês (MOE, 2016), um guia para promover o adequado tratamento para o fim de vida dos módulos FV, abordando a reciclagem. Nos Estados Unidos, os estados da Califórnia e de Washington possuem tratativas a parte para o tema. Especificamente no estado da Califórnia foi aprovada em 01 de outubro de 2015 a lei No. 489 (Califórnia Legislature, 2015) que autoriza o Departamento de Controle de Substancias Tóxicas (DTS) a adotar regulação para descarte dos módulos solares no fim de vida útil. Os componentes dos módulos considerados resíduos perigosos são classificados e gerenciados como “*universal waste*”, mesma categoria de baterias, pesticidas, equipamentos que contenham mercúrio, lâmpadas fluorescentes, neon, vapor de mercúrio, sódio, entre outras. No estado de Washington em julho de 2107 foi aprovada a lei 5939 (Washington Legislature, 2017) que requer o sistema de logística reversa e programa de reciclagem para a gestão de fim de vida dos módulos.

China e Coreia, mercados que vem crescendo bastante, há regulamentação para lixo eletrônico, mas não inclui sistemas F. Entretanto, nesses países o desenvolvimento de pesquisas para tecnologias de reciclagem tem contribuído com sugestões para políticas e regulamentações específicas de fim de vida dos módulos FV que recomendam a reciclagem.

Na Índia, assim como no Brasil, o descarte de módulos FV segue regulamentação do lixo eletrônico.

6. EXEMPLOS DE ADERENCIA ÀS REGULAMENTAÇÕES PARA GESTÃO DO FIM DE VIDA

As experiências de gestão do fim de vida de módulos FV, particularmente em mercados mais maduros como na União Européia, tem identificado inúmeras lições aprendidas e melhores práticas. Tecnologia para a reciclagem de módulos FV tem sido pesquisada ao longo dos últimos 15 anos, muitas conduzidas pelos próprios fabricantes dos módulos. As barreiras para a adoção de estratégias de gestão do fim de vida dos módulos FV de forma a tornar o processo industrial ainda são o alto custo dos processos, o volume ainda reduzido e a dificuldade de logística reversa. Institutos de pesquisas têm avaliado diferentes

opções para reciclagem dos módulos FV. Não será objeto deste artigo explorar ou detalhar as diversas tecnologias de reciclagem dos módulos FV. Os projetos citados servem como observação e estudos para viabilizar suas praticas em outras localidades.

6.1. Projeto CU-PV

O projeto CU-PV (2012) é um projeto colaborativo de pesquisa que recebe fundos da União Européia e desenvolve pesquisas de tecnologias para módulos FV e tem alguns objetivos como: reduzir o consumo de silício para reduzir o consumo de energia demandada no processo de produção dos módulos FV; reduzir fortemente o uso de chumbo; reduzir o EPBT de sistemas FV; desenvolver projeto em tecnologias FV contemplando a reciclagem no fim da vida útil. O projeto tem como alvo tornar a tecnologia FV sustentável melhorando a reciclabilidade dos módulos FV com tecnologias para padrões de produção mais sustentável que reduzem o consumo de matérias primas reduz a poluição e fomentam o uso de matérias primas secundárias.

6.2. PV Cycle

A PV Cycle foi fundada em 2007 como uma associação sem fins lucrativos que oferece aos seus membros soluções para o descarte no fim de vida dos módulos FV com o objetivo de tornar sustentável o ciclo de vida da produção de módulos FV. Começou como uma iniciativa voluntária e passou a seguir os processos em acordo com o WEEE. Segundo informações da associação, há soluções de reciclagem para todas as tecnologias do mercado de FV e a taxa de reciclagem de módulos baseados em silício é de 90% e demais tecnologias de 97%. De acordo com o relatório de status da empresa, volume tratado de 2010 a 2017 é de 19.195 t, com destaque para os volumes operados na França, Alemanha e Itália (PV Cycle, 2017). Grande maioria dos fabricantes de módulos faz parte do programa PV-Cycle.

6.3. First Solar

A First Solar é uma empresa americana que oferece soluções para reciclagem de sistemas FV da tecnologia CdTe. Começou a desenvolver tecnologias desde 2005 e atualmente segundo informações já consegue recuperar 90% de materiais semicondutores (First Solar, 2018). A empresa inclui nos módulos que comercializa a identificação e informações para que os consumidores efetuem a devolução, sem custos, dos módulos ao final da vida útil.

6.4. Projeto FRELP – Full Recovery End of Life Photovoltaic

O projeto FRELP foi financiado pela União Europeia (EU Environment life Programme) e teve por objetivo desenvolver tecnologias para reciclagem integral dos módulos FV (baseados em silício) no final de vida. O projeto foi desenvolvido entre 2013 e 2015 em parceria com a PV Cycle Itália, conseguindo alcançar solução tecnicamente viável para o processo de tratamento que permite maximizar as quantidades de materiais recuperados com pretensão de em 2017 começar a operação piloto com escala industrial (FRELP Project, 2015).

6.5. Deutsche Solar - SolarWorld AG

Solar World é uma empresa alemã que trabalha o tema de reciclagem desde 2003. Segundo informações da empresa, desde 2013 a empresa recebe voluntariamente os módulos, da tecnologia c-Si para correto tratamento e reciclagem (Solar World, 2015).

7. CONCLUSÃO

Esse artigo examinou a potencial necessidade da gestão do fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos, analisando diferentes estratégias, projetos e regulamentação existentes.

Atualmente os módulos FV são enquadrados como eletrônicos. Em si tratando do descarte dos eletro-eletrônicos, como previsto na lei de resíduos sólidos, a fiscalização brasileira é fraca para controle da logística reversa e descarte correto. Espera-se que o problema do descarte dos módulos FV ganhe destaque a partir de 2030 quando o volume de descomissionamento passará a ser expressivo. Contudo a formulação e implementação de políticas e regulamentações são demoradas e suas discussões estendem por anos. Neste tempo, se por efeito de algum dano estes sistemas são inutilizados, o descarte correto fica dependendo de ações individuais de monitoramento e controle por parte de fabricantes/fornecedores e conscientização do próprio consumidor.

Além do problema dos materiais tóxicos, com risco à sua exposição e comprometimento ao meio ambiente, a matéria prima para fabricação dos módulos tende a se tornar escassa, afetando a produção destes módulos futuramente. A chave para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica pode estar na regulamentação e processos para reciclagem e reuso na própria fabricação dos módulos.

A gestão do fim de vida dos módulos FV apresenta como um eficiente caminho para reduzir os impactos, pois não somente dará fim à quantidade de lixo produzida, assim como, o cenário de reaproveitamento de materiais no lugar de utilização de matéria prima nova, trará benefícios através da redução do consumo de energia que se pode ter na fase de produção dos módulos FV. É esperado que em alguns anos já seja possível encontrar plantas dedicadas e processos industriais estabelecidos para a reciclagem dos módulos FV.

Entretanto verifica-se a existência de barreiras para a implementação das estratégias de gestão, que sem incentivos adequados tornam-se desfavoráveis diante da alternativa de descarte em aterros. É fundamental que políticas e instrumentos eficientes, claramente regulamentados com papéis e responsabilidades fornecem vantagens competitivas para assim suportarem a transição para energia fotovoltaica como fonte de energia sustentável.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Jamil Haddad pelo apoio durante a elaboração deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

ABINEE. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da Abinee, 2012.

ANEEL. Resolução normativa 247, 2006. Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, comunidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2006247.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

ANEEL. Resolução normativa 482, 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

ANEEL. Resolução normativa 687, 2015. Altera a resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

ANEEL. Resolução normativa 77, 2004. Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Brasília: MME/EPE, 2017. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>. Acesso em: Julho de 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), 2015. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>>. Acesso em: Abril de 2018.

BRASIL. Lei n. 12.305,2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: Abril de 2018.

California Legislature. Hazardous Waste: Photovoltaic Modules, Senate Bill No. 489, 2015. An act to add Article 17 (commencing with Section 25259) to Chapter 6.5 of Division 20 of the Health and Safety Code, relating to hazardous waste. Disponível em <https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160SB489>. Acesso em: Julho de 2018.

CCEE. Câmara de comercialização de energia elétrica. Migrações para o mercado livre de energia crescem 25 vezes em 2016. CCEE, 2016

Choi, J-K; Fthenakis, V. Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives. Journal of Cleaner Production 66 (443-449), 2014.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Proposta de resolução que dispõe sobre resíduos de equipamentos eletrônicos, resultado das discussões na 3ª reunião do GT Eletroeletrônicos, em 27 e 28/07/2010. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/PropResolREEE3oGT27e28jul10Vlimpa.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

Cucchiella, F. et al. End of life of used photovoltaic modules: a financial analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 47 (552-561), 2015.

CU-PV Project for-recycling in PV module technology, 2012. Disponível em <<http://www.sustainablepv.eu/cu-pv/description>>. Acesso em: Julho de 2018.

ElektroG - Electrical and electronic equipment Act. Alemanha, October, 2015. Act governing the sale, return and environmentally sound disposal of electrical and electronic equipment.

European Commission DG ENV. Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEE Directive. Final Report, 2011.

EU - European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).

Fthenakis, V. End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy* 28 (1051-1058), 2000.

First Solar. Modules recycling. Disponível em <<http://www.firstsolar.com/en/Modules/Recycling>>. Acesso em: Julho de 2018.

FRELP – Full Recovery End of Life Photovoltaic. Disponível em <<https://frelp.info/the-project/>>. Acesso em: Julho de 2018.

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

IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies. Recycling Report IEA-PVPS Task 12, 2018.

IEA – PVPS - International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme. Trends 2016 in photovoltaic applications. Report IEA PVPS T1-30:2016.

IRENA - International Renewable Energy Agency; IEA-PVPS- International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme. End of life management: solar photovoltaics panels Report IRENA and IEA –PVPS, 2016.

IBAMA. Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. Instrução normativa nº 13 de 18 de dezembro de 2012. Lista brasileira de resíduos sólidos.

MINAS GERAIS. Decreto nº 46.296, de 14 de agosto de 2013. Dispõe sobre o Programa Mineiro de Energia Renovável – Energias de Minas – e de medidas para incentivo à produção e uso de energia renovável. Disponível em: <<http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=46296&comp=&ano=2013>>. Acesso em: Abril de 2018.

MINAS GERAIS. Lei nº 20.849, de 8 de agosto de 2013. Institui a política estadual de incentivo ao uso da energia solar. Disponível em: <<http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=20849&comp=&ano=2013>>. Acesso em: Abril de 2018.

MOE - Ministry of Environment, Japan. A Guideline of promoting recycling and proper treatment of end-of-life PV equipment, 2016. Disponível em: <<http://www.env.go.jp/press/files/jp/102441.pdf>>. Acesso em: Julho de 2018.

PV Cycle. Annual Report, 2017. Disponível em <<http://www.pvcycle.org/>>. Acesso em: Agosto de 2018.

Rüther, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

Solar World. Modules recycling. Disponível em < <http://www.solarworld.de/en/group/from-sand-to-module/recycling/>>. Acesso em: Julho de 2018.

Stoppato, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy* v. 33, p. 224–232, 2008.

UK – United Kingdom. Regulation 3113 – Environmental protection. Waste Electrical and Electronic Equipment Regulations 113/2013. Disponível em < http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2013/3113/pdfs/ukxi_20133113_en.pdf>. Acesso em: Julho de 2018.

Wambach, K; Alsema, E. A. Life cycle of solar module recycling process. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 895, 2006.

Washington States Legislature. Promoting a sustainable, local renewable energy industry through modifying renewable energy system tax incentives and providing guidance for renewable energy system component recycling, Senate Bill 5939, 2017. Disponível em: <[http://app.leg.wa.gov/bills/summary?BillNumber=5939&Year=2017](http://app.leg.wa.gov/bills/summary/BillNumber=5939&Year=2017)>. Acesso em: Julho de 2018.