

**Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos****Disposal, recycling and reverse logistics: end-of-life analysis of photovoltaic panels**

DOI:10.34117/bjdv6n9-693

Recebimento dos originais: 26/08/2020

Aceitação para publicação: 29/09/2020

**Fernanda Tátia Cruz**

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)  
Instituição: Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) / Campus: Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (Icea)

Endereço: Rua Trinta e Seis, nº115, Loanda, João Monlevade - MG, Brasil.

E-mail: fernanda.cruz@ufop.edu.br

**Marcelo Henrique Isidoro**

Graduando do curso de Engenharia Elétrica  
Instituição: Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) / Campus: Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (Icea)

Endereço: Rua Trinta e Seis, nº115, Loanda, João Monlevade - MG, Brasil.

E-mail: marcelo.isidoro@aluno.ufop.edu.br

**Igor Santos e Fernandes**

Graduando do curso de Engenharia Elétrica  
Instituição: Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) / Campus: Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (Icea)

Endereço: Rua Trinta e Seis, nº115, Loanda, João Monlevade - MG, Brasil.

E-mail: igor.sf@aluno.ufop.edu.br

**RESUMO**

A alta demanda por energias renováveis propiciou um crescimento exponencial da energia solar fotovoltaica. Entretanto, sabe-se que ao fim de sua vida útil, o módulo se torna obsoleto e na maioria das vezes é descartado de forma indevida. A reciclagem se apresenta como uma alternativa para diminuir os impactos ambientais e o consumo de energia na produção. Dessa forma, cabe também a implementação de canais de logística reversa, a fim de conscientizar sobre a responsabilidade com o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Painéis Solares; Reciclagem; Logística Reversa; Meio Ambiente.**ABSTRACT**

The high demand for renewable energy has led to an exponential growth of photovoltaic solar energy. However, it is known that at the end of its useful life, the module becomes obsolete and most of the time it is improperly discarded. Recycling presents itself as an alternative to reduce environmental impacts and energy consumption in production. Thus, it is also necessary to implement reverse logistics channels in order to raise awareness of environmental responsibility.

**Keywords:** Solar Panels; Recycling; Reverse Logistics; Environment.

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia vem aumentando significativamente devido ao crescimento populacional e à evolução industrial segundo retrata Kannan (2016). Paralelamente, Pupin (2019) ressalta que apesar do forte domínio das fontes não renováveis de energia, há uma crescente busca pelas fontes renováveis devido às crises e limitações de recursos finitos, como o petróleo (Abuabud e Barra, 2020).

Com a alta procura por fontes de energia limpa no mundo, o mercado de painéis fotovoltaicos tem crescido nos últimos anos. Mesmo com uma vida útil entorno dos 25 anos (Klugmann-Radziemska e Ostrowski, 2010), a reciclagem dos painéis é um assunto extremamente relevante atualmente, visto que nos próximos anos quantidades exorbitantes destes equipamentos serão descartadas como resíduo eletroeletrônico (Machado, 2017).

Como qualquer produto fabricado, o descarte de painéis solares dificilmente é ecológico. Os principais impactos do descarte incorreto desses resíduos estão associados à lixiviação de metais pesados, à perda de recursos convencionais (principalmente vidro e alumínio) e à perda de metais raros como a prata, o índio, o gálio e o germânio (Véronique Monier, 2011). Além disso, os painéis solares que são jogados de maneira inapropriada podem acabar em grandes aterros sanitários (Marsh, 2018).

Além da proteção ambiental, Marsh (2018) diz que a reciclagem de painéis solares também terá impacto na economia, pois diversos materiais possuem valor econômico de interesse e que, se recuperados, podem ser reciclados facilmente (Brouwer et al., 2011). Dessa forma, conforme observado por Ghizoni (2016), a reciclagem dos módulos fotovoltaicos aparece como uma das alternativas para minimizar a questão do acúmulo de resíduos gerados, transformando os materiais obsoletos em novas fontes de matéria prima. Ela ainda complementa que, uma vez recuperado, o material volta a circular na economia, servindo para a produção de novos produtos ou sendo vendido em outros mercados de interesse.

Classicamente, a grande preocupação da indústria está focada apenas em aspectos econômicos (Cruz et al., 2020). Assim sendo, Soares (2017) relata que produzir em quantidades ideais para atender 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. Ademais, explicita que, em vista às crescentes preocupações com o 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.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo apresentar dados importantes acerca do descarte e reciclagem dos módulos solares fotovoltaicos por meio de uma revisão bibliográfica e através desta, apresentar os principais métodos que são utilizados no Brasil e em todo o mundo. Ainda, será abordado os desafios para a logística reversa desses materiais e metodologias que poderão ser utilizadas como ponto de partida. Podendo assim, alinhar a conscientização ambiental com o impacto econômico, que pode ser causado com a reciclagem e reuso da matéria-prima utilizada na fabricação dos painéis.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

No mundo contemporâneo, é constante a busca por meios de geração de energia renovável, que por sua vez contribuem para a regulação dos gases poluentes na atmosfera. Esse fato exemplifica a necessidade de buscar novos meios de geração alternativa, que se torna evidente quando se analisa o aumento da procura por energia fotovoltaica, principalmente no Brasil. Segundos dados do BIG- Banco de Informações de Geração, Minas Gerais é o estado com maior produção de energia solar do país com o equivalente a 18,8% (ANEEL, 2020), o que favorece ainda mais o aprimoramento dessa tecnologia de geração sustentável na Microrregião do Médio Piracicaba localizada no estado de Minas Gerais.

Em função do aumento considerável do sistema fotovoltaico instalados no Brasil e no mundo, em todas as perspectivas de projetos já publicados, os meios de contenção mais viáveis dos resíduos de painéis solares ao fim de sua vida útil. Diante disso, é de suma importância gerenciar esse fluxo de resíduos para garantir o descarte correto das substâncias perigosas, bem como a recuperação e a reciclagem de recursos com alto valor agregado (Paiano, 2015). Contudo, entende-se que grande parte dos painéis produzidos são os de silício cristalino, correspondente a 80% de módulos fotovoltaicos globais, além de existir outras categorias de módulos solares que também são de extrema relevância, porém pouco utilizadas (Mahmoudi et al., 2019). Em consequência disso, infere-se que a grande maioria de resíduos futuros de materiais dos painéis serão de silício cristalino, o que corrobora um estudo mais direcionado para esse tipo de tecnologia.

O sistema fotovoltaico (PV) de geração de energia baseia-se na captação de luz solar que é convertida em energia elétrica por meio dos componentes presentes nos painéis solares. Em detrimento disso, entende-se que os diferentes tipos de classificação dos painéis solares se correlacionam com os diferentes materiais de captação de luz solar (Tao e Yu, 2015). De um modo

amplo, classifica-se em duas diferentes categorias, sendo a primeira geração os módulos convencionais de silício cristalino (c-Si) e a segunda geração são os módulos de película fina, que consta com o material semiconductor Telureto de Cádmio - CdTe (Tao e Yu, 2015). Ademais, é válido ressaltar a existência de uma terceira geração de painéis solares, baseadas em novas tecnologias que buscam eficiências similares a primeira geração, porém com a intenção de reduzir custos. Todavia, refere-se a uma tecnologia que está em processo de desenvolvimento e na sua produção consta-se como inviável para o mercado contemporâneo, mas com grandes expectativas futuras (Proença, 2007).

Seguindo essa linha de pensamento, constrói-se uma estrutura para uma melhor visualização das categorias empregadas em função da geração. Paiano (2015), demonstra por meio de um esquema que analisa as três versatilidades de tecnologias dos painéis fotovoltaicos, representado na Tabela 1 referenciada por (Mahmoudi et al., 2019).

Tabela 1. Gerações fotovoltaicas.

<b>Geração fotovoltaica</b>	<b>Tipo de módulo fotovoltaico por tecnologia</b>
Primeira geração (c-Si)	a) Monocristalino b) Policristalino c) Folhas de fita
Segunda geração (película fina)	a) Silício amorfo (a-Si) b) Telureto de cádmio (CdTe) c) Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e disseleneto de cobre e índio (CIS)
Terceira geração: CPV fotovoltaico concentrado e tecnologias emergentes	a) CPV b) Células solares sensibilidades por corantes c) Células solares orgânicas d) Células híbridas

## 2.1 COMPONENTES DA PRIMEIRA GERAÇÃO

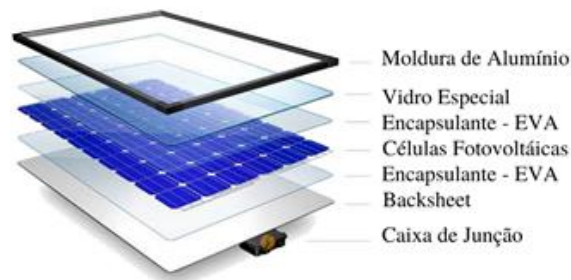
A tecnologia fotovoltaica possui componentes com design relativamente simples por converter luz em energia de maneira instantânea (Barker e Bing, 2005). Esses dispositivos derivados do silício cristalino (silício monocristalino e silício policristalino), silício amorfo, disselenato de cobre e índio e telureto de cádmio são comumente caracterizados como semicondutores nos painéis fotovoltaicos (Kannan, 2016). Em detrimento disso, os painéis de

“primeira geração”, que são os mais vendidos no mercado atualmente, se compõe pelo uso de dois tipos de silício, sendo o monocristalino o de maior pureza e de maior valor no mercado, o que explica sua maior eficiência, e o policristalino que passa por um processo mais simples de purificação e conseqüentemente tem um valor reduzido, com eficiência um pouco inferior. Todavia, na prática, definir qual modelo é melhor não é notável, estudos mostram que a relação custo de produção e eficiência de geração dos dois modelos são equiparáveis, pois se diferem basicamente na fundição e purificação do silício (Rocha, 2015). Sabe-se ainda que o silício é um mineral com ampla disponibilidade no mercado, com um processo bem definido para sua obtenção, que inicia com a purificação desse mineral, posterior o seu derretimento e por final ele é ordenado em lingotes - processo em que será cristalizado para a formação de camadas uniformes (Silva e Afonso, 2009).

Conforme já exposto, a formação dos módulos solares varia de acordo com a tecnologia envolvida, podendo ser de primeira, segunda ou terceira geração. Em uma visão geral, aborda-se a tecnologia dos painéis fotovoltaicos de “primeira geração”, em que os módulos são envoltos por uma estrutura mecânica bem compactada que pode ser visualizada facilmente na Figura 1. Diante do exposto, nota-se que comumente o sistema possui três camadas envolvidas por uma moldura de alumínio final, que se divide em seis submatérias montadas uma sobreposta a outra (Oliveira, 2019).

A primeira camada se inicia com um vidro temperado que tem como objetivo proteger o conjunto como um todo da célula, este deve ser resistente a choques mecânicos para garantir uma melhor durabilidade; a segunda camada é onde se localiza as células de silício com filamentos metálicos, e estão protegidas e isoladas com uma camada anterior e posterior de material encapsulante conhecido como Acetato Vinil Etileno (EVA), o que impede uma movimentação irregular das células em caso de impactos. E na parte inferior que corresponde a terceira e última camada, se encontra um material polimérico chamado Backsheet, este, é um isolante elétrico com objetivo de proteger a parte posterior do painel contra a umidade e entrada de gases. Na parte lateral posterior, se encontra a caixa de junção que é responsável por conectar todas as células (Carneiro, 2010 e Pupin, 2019).

Figura 1. Estrutura dos Painéis Fotovoltaicos (Pupin, 2019).



Sobretudo, é válido ressaltar a presença de alguns elementos de grande valor que se destacam nos painéis fotovoltaicos de primeira geração, como a presença de silício, prata, cobre, alumínio e vidro (Dias et al., 2016). O silício em especial (Si) é um elemento de muito valor comercial, em sua forma sólida este corresponde ao segundo elemento mais abundante da terra e está presente como principal matéria prima de diversos produtos, como o vidro e alguns semicondutores (RSC, 2014). Salienta-se que o Brasil é país com maior reserva de quartzo no mundo, por onde se extrai grande parte de silício, entretanto a maioria do elemento extraído não passa por um processo de purificação e não se adequa a fins comerciais, logo grande parte da exploração é influenciada por empresas estrangeiras que fazem essa extração por custo mínimo e exportam o material modificado com valores altíssimos para o Brasil (MME, 2009).

Para o estudo de descarte e reciclagem dos painéis solares, embasou-se em trabalhos já publicados. A expertise desse trabalho foi apresentar de forma objetiva os principais recursos existentes, a fim de fomentar uma análise do que poderá ser feito com os painéis ao fim de sua vida útil. Para isso, foi fundamental compreender a função de cada componente e mostrar como eles impactam de diversas formas sendo descartados, bem como os benefícios da sua reciclagem.

Com o objetivo de expressar visualmente esse grande número de módulos fotovoltaicos, utilizou-se o software QGIS para representar todas as gerações distribuídas no país, constatando no mapa grandes concentrações de painéis especialmente nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste. Para isso, utilizamos dados disponibilizados na Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, transformando coordenadas em pontos de geração de energia.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 DESCARTE**

Atualmente no Brasil existem 228.229 mini e micro-gerações distribuídas e grande parte dessas foram instaladas nos últimos 10 anos (ANEEL, 2020). Todo esse material gerará uma

enorme quantidade de resíduos no meio ambiente, especialmente nas regiões com maior concentração. A Figura 2 apresenta um mapa feito no software QGIS com todas essas gerações no território nacional.

Figura 2. Geração Distribuída no Brasil.



Segundo Lisperguer e colaboradores (2017), apresentado em sua pesquisa, abrange maneiras viáveis de solucionar um destino para os módulos fotovoltaicos, com métodos que tecnologias de reciclagem que descreve um benefício ambiental e viabilidade econômica. Porém, menciona uma grande quantidade de resíduos que estão sendo descartados de maneira inadequada, além de políticas não preparadas, uma vez que, grande parte do lixo eletrônico dos materiais dos painéis é descartado nos aterros em países emergentes, sem o devido cuidado, o que acarreta ainda mais o problema. Portanto, com a baixa eficácia do descarte de painéis fotovoltaicos em função de um desafio ambiental, novas estratégias para a reciclagem de painéis solares cristalinos se faz necessária, evoluindo na questão social, econômica e ambiental. Esse fato proporciona ser mais constante com o programa adotado pelas Nações Unidas em 2015, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que visa estruturar melhores oportunidades de formar uma relação indústria e meio ambiente sustentável.

Ainda nessa pesquisa, os autores Lisperguer e colaboradores (2017) concluem que a melhor maneira de se ter um controle das resíduos de painéis solares futuros é desenvolver uma metodologia de reciclagem e logística reversa que sejam eficientes economicamente e que utilizem menos gastos energéticos para separar os componentes dos painéis, além de criar políticas públicas mais rígidas. Esse método se baseia em especial “de berço ao berço” (C2C), esse deduz que o crescimento econômico deve ser alcançado de maneira sustentável, projetando e fabricando produtos em um ecossistema industrial limpo e usando-os dentro um circuito fechado que finalmente os retorna à sua fonte (McDonough e Braungart, 2002). Portanto, o método

baseado nessa filosofia de berço ao berço (C2C) - que tem como objetivo evitar poluição do meio ambiente levando em consideração todo o ciclo de vida – pode ser aplicado para o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, e sua produção implica a reutilização dos componentes compreendendo um sistema circular de reciclagem, mais compreendido por uma logística reversa (Lisperguer et al., 2017).

### 3.2 RECICLAGEM

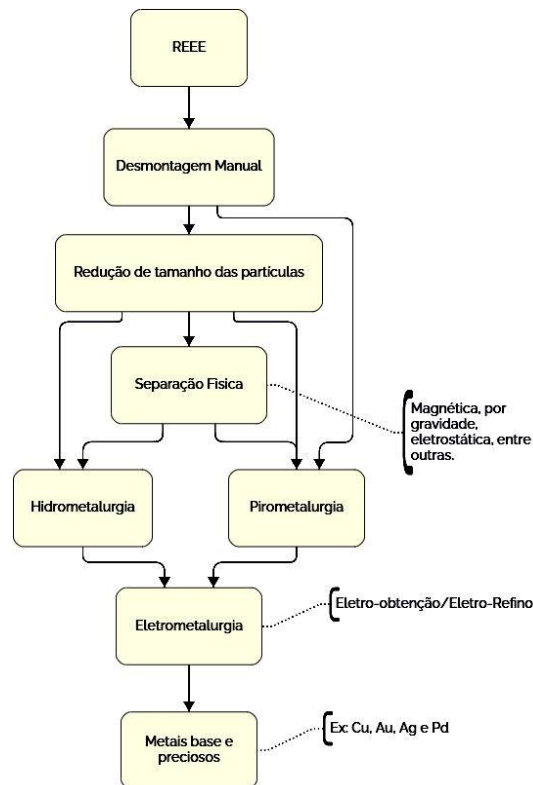
De acordo com Bettanin (2017), no processo de destinação final dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) existem 3 opções principais: reuso, remanufatura e reciclagem. O reuso ocorre quando o resíduo não mais satisfaz as condições necessárias ao consumidor original, porém ainda possui valor de uso para outros. A remanufatura é a reutilização das peças para a produção de equipamentos novos ou seminovos. Para isso, os resíduos são desmontados, limpos, reparados e então remontados em um produto final (Williams et al., 2001). A reciclagem, por sua vez, é realizada quando as outras duas opções anteriores não puderem ser aplicadas. Neste caso, o resíduo é reprocessado, em uma etapa que envolve a desmontagem e/ou a destruição do equipamento original para se obter os materiais de valor contidos neste (Cui e Zhang, L., 2008).

No processo de reciclagem dos equipamentos eletroeletrônicos é bastante comum a realização de etapas de desmontagem e processos mecanizados, com o intuito de concentrar os materiais de interesse (Cui e Forssberg, 2003). Após isso, diferentes técnicas podem ser utilizadas para a remoção de impurezas, como a pirometalurgia e a hidrometalurgia (Cui e Zhang, L., 2008).

A Figura 3 adaptada por (Bettanin, 2017), apresenta alguns processos típicos para a recuperação de metais provenientes de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.



Figura 3. Fluxograma de típicos processos para a recuperação de metais provenientes de REEE. Adaptado: Yazici e Deveci, 2009.

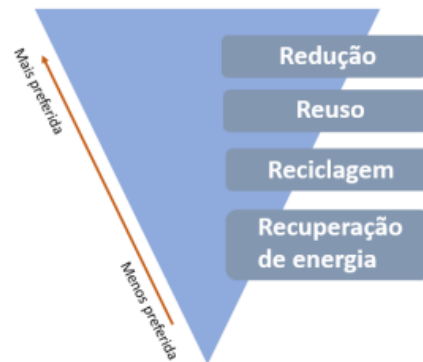


Paralelamente, Miranda (2019) complementa que os módulos fotovoltaicos no final de sua vida não podem ser vistos apenas como uma quantidade de resíduo inútil que deve ser descartada. Tão logo, ela apresenta estratégias que podem ser adotadas quando se trata da reciclagem deles: redução, reuso, reciclagem e recuperação. Tais estratégias fazem parte do estudo dos 4R's propostos por IRENA e IEA-PVPS (2016).

A primeira estratégia é a da redução do uso de materiais na fabricação dos módulos fotovoltaicos. Ela deve ser a estratégia preferida para pensar na gestão do fim de vida dos painéis fotovoltaicos, uma vez que os mesmos possuem metais pesados que contêm substâncias perigosas (IRENA e IEA-PVPS, 2016).

Além disso, o uso de metais raros como a prata, embora representem menos de 1% da massa total do módulo, pode contribuir para a escassez do recurso na natureza (Miranda, 2019). Dessa forma, é imprescindível que a redução ocorra especialmente no processo de produção dos painéis, envolvendo pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias, utilizando materiais que não estejam em escassez e que não degradem o meio ambiente.

Figura 4. Gestão do fim de vida de módulos FV baseada no princípio 4R's. (Miranda, 2019)



A segunda estratégia é a de reuso, que envolve a recuperação de sistemas (retrofit e remodelagem) ou parte dos componentes nos módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil. Conforme IRENA e IEA-PVPS (2016), mesmo após o fim de sua vida útil, que é entorno dos 30 anos, muitos sistemas continuam intactos. Algumas falhas prematuras durante a vida útil dos módulos podem ser reparadas e assim, recuperadas para reuso (Miranda, 2019). Algumas plataformas alemãs como Secondsol ([www.secondsol.de](http://www.secondsol.de)) e PVXchange ([www.pvXchange.com](http://www.pvXchange.com)) já utilizam essa estratégia, e, os módulos que não podem ser reparados ou reusados, seguem para tratamento e reciclagem dos resíduos.

A terceira estratégia é a da reciclagem, que consiste na recuperação desses materiais e sua posterior utilização como matéria prima. Wang (2016), apresentou um estado da arte com as principais metodologias que foram utilizadas para reciclar os módulos fotovoltaicos. Em sua pesquisa, ele mostra através da separação física ou química, quase todos os materiais podem ter uma destinação final para reciclagem, o que abre um leque de alternativas para que os materiais não seja descartados sem um fim útil.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos conseguiria recuperar grande parte desses materiais quando os módulos se tornarem obsoletos. É possível recuperar mais de 90% dos componentes principais dos módulos, sendo que parte desse material reciclado, como o caso do próprio silício, pode ser utilizado para a produção de novas células fotovoltaicas. (PVCycle, 2018). Outrossim, vale ressaltar que a energia que é consumida na produção de módulos fotovoltaicos, sendo esses de materiais reciclados, é de 30% em relação aos fabricados com matéria prima extraída (Wambach e Alsema, 2006). Isso evidencia que a reciclagem além de reduzir o impacto ambiental, diminui drasticamente o consumo de energia elétrica usado na produção de novos painéis.

A quarta estratégia considera a recuperação de energia, levando em consideração o aproveitamento energético dos resíduos dos módulos fotovoltaicos pelo processo de incineração (Miranda, 2019). Nesse processo, o calor gerado pela queima dos resíduos pode ser utilizado para a geração de energia elétrica.

Por fim, a reciclagem e a recuperação de energia são alternativas que propiciam a redução dos impactos ao meio ambiente, e, além disso, podem contribuir para a redução do consumo de energia elétrica na fase de produção dos módulos fotovoltaicos. Conseqüentemente, a redução do gasto de energia impacta também no preço médio dos módulos fotovoltaicos, conforme pôde ser alcançado em outras literaturas (European Commission DG ENV, 2011 e Cucchiella et al., 2015).

### 3.4 LOGÍSTICA REVERSA

Segundo Soares (2017), 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.

Mediante isso, McDonough e Braungart (2002) complementam que é necessário garantir mecanismos de financiamentos adequados para a recuperação de painéis fotovoltaicos, sendo que as vantagens econômicas devem incentivar a indústria fotovoltaica a tornarem-se mais sustentáveis e limpas. A indústria, no entanto, precisaria desenvolver um novo modelo de negócios, e, as pesquisas e mecanismos financeiros para isso são uma área para futuras pesquisas.

Uma metodologia muito abordada na bibliografia é a Cradle-to-cradle (C2C). Essa alternativa, que em português significa “do berço ao berço”, propõe que os produtos sejam projetados para evitar a poluição do meio ambiente, não apenas durante a fabricação, mas durante toda a vida útil. A produção de produtos C2C implica em um sistema industrial circular, onde todos os materiais que são utilizados como recursos primários possam ser utilizados para fazer o mesmo produto ou outro, sem perda de qualidade. Esse processo pode ser considerado como “up-cycling” (McDonough e Braungart, 2002).

A certificação C2C pode ser entendida com um forte indicador de um produto que preze pelo meio ambiente. Durante todo o processo de certificação, os produtos são avaliados em cinco critérios que devem ser atendidos (MBDC LLC, 2012). Os critérios podem ser entendidos da seguinte maneira:

**A) Saúde dos materiais:** os produtos C2C são fabricados com materiais não tóxicos. Se um componente tóxico não puder ser substituído, ele deverá estar bem encapsulado para ser reutilizado no final da vida útil do produto.

**B) Reutilização de material (up-cycle):** Isso implica um ciclo de ciclo fechado, onde os materiais fluem repetidamente sem perda de valor e qualidade. A reciclagem do material é essencial para obter taxas eficientes de reutilização.

**C) Administração da água:** O uso da água em processos industriais deve ser controlado e eficiente. Evite a poluição da água.

**D) Gerenciamento de energia renovável e carbono:** maximize o uso de fontes e tecnologias de energia renovável e promova o uso eficiente de energia.

**E) Justiça social:** o planejamento e o design devem sempre considerar as condições sociais e econômicas locais em que as instalações industriais estão incorporadas.

Além disso, é extremamente importante que o Estado e os órgãos regulamentadores iniciem um trabalho para divulgação de números de painéis fotovoltaicos que foram reciclados ou passaram por logística reversa. Dados como esses servem de suporte para que o Poder Legislativo tenha maior embasamento de como atuar em cima da problemática. Também, é precípua importância a viabilização de incentivos, sejam eles tarifários ou até mesmo investimentos de capital, de forma que as empresas sejam encorajadas a implementar produtos C2C no mercado.

Dando enfoque em uma região específica, a Microrregião do Médio Piracicaba/MG é composta por 12 cidades (Alvinópolis, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Itabira, João Monlevade, Nova União, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santa Maria de Itabira, São Domingos do Prata e São Gonçalo do Rio Abaixo) e mais de 600 gerações distribuídas (ANEEL, 2020). A Figura 5 apresenta em detalhes esses dados.

Diante de tal situação, poderia se pensar em uma parceria entre as empresas de energia solar fotovoltaica com as que trabalham com reciclagem. Nessa região em específico, ressalta-se a presença da Atlimarjon, uma empresa localizada no município de João Monlevade/MG, que trabalha com a reciclagem de resíduos que são descartados pela população.

Figura 5. Geração Distribuída Microrregião do Médio Piracicaba.



Proporcionando parcerias como essa, inúmeros painéis poderão ser descartados de forma correta e reutilizados como matéria prima em diversos outros produtos. Sendo assim, uma grande iniciativa para conter o impacto ambiental, que poderá ser causado com o descarte indevido em massa de painéis fotovoltaicos nos próximos anos.

#### 4 CONCLUSÃO

Contudo, entende-se que a alta demanda por geração de energia renovável impacta positivamente no aumento da produção de painéis fotovoltaicos no Brasil e no mundo, entretanto, acarreta um aumento desenfreado de resíduos desses módulos ao final de seu ciclo de vida, que varia entre 25 e 30 anos. Esse fato é preocupante, visto que é um problema porvindouro e apenas países como a China, EUA e Alemanha possuem estrutura e políticas mais favoráveis para a contenção do mesmo, embora o estudo de reciclagem e logística reversa ainda esteja em desenvolvimento e não há soluções concretas para resolver esse impasse. Em detrimento disso, analisou-se diversas vertentes dispostas a contribuir com esse fator, em que se destaca como um todo as medidas consideradas mais eficazes para solucionar os impactos futuros causados pelos resíduos dos painéis solares. Essa perspectiva proporcionou compreender alguns critérios que melhor se adequem as políticas sociais e econômicas dos países, que consiste na análise do ciclo de vida e construção dos módulos.

Em função disso, destaca-se quarto resultados estudados na literatura que possuem um alto valor de eficácia. Equiparam-se em: substituir certos materiais na composição dos módulos, são eles elementos tóxicos e elementos que vão estar em escassez na natureza se explorados em demasiado, como o chumbo (Pb) e a prata (Ag) respectivamente. Outra técnica, seria a capacidade de reutilizar sistemas completos ou parte dos componentes dos painéis, ainda em bons estados de conservação ao fim da vida útil. Ademais, outra possibilidade abordada e a mais dotada na contemporaneidade seria a reciclagem dos materiais, este método torna-se possível com a separação dos elementos em processos térmicos e químicos, contendo uma vigência de 90%, todavia rege um custo elevado. Do mesmo modo, uma alternativa um pouco não peculiar, seria a produção de energia através da queima de resíduos dos painéis para ser convertida em energia, transformando energia térmica em elétrica. Essa alternativa vai contra ao princípio de contribuir com o meio ambiente, porém a energia produzida seria usada para a produção de novos painéis o que atenua os gastos em energia no processo de produção.

Por fim, as placas fotovoltaicas são consideradas resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), o que facilita a aplicação de políticas públicas para uma melhor capacitação de se aplicar a logística reversa no Brasil. Sobretudo, conclui-se que diversos fatores dificultam o aprimoramento das melhores alternativas de reciclagem no Brasil e em especial na Microrregião do Médio Piracicaba, como uma gestão de resíduos, implementação e adequação de políticas especializadas, o que caracteriza assim um desafio quanto a destinação final dos painéis solares fotovoltaicos.

#### **AGRADECIMENTOS**

À PROPP/Ufop pela aprovação do Projeto no Edital PIVIC 1S/Ufop N° 26/2019.

Ao Programa Institucional de voluntários de iniciação científica da Ufop – PIVIC/Ufop.

**REFERÊNCIAS**

- ABUABUD, J. P. M; BARRA, P.H. A. **A systematic study on microgrids and smart grids.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 65712, 2020.
- BANKER, PP; BING, JM. **Avanços na tecnologia solar fotovoltaica : uma perspectiva de aplicações.** Anais de engenharia de energia. 2005.
- BETTANIN, A. **O uso de tiosulfato para a recuperação de Prata na reciclagem de módulos fotovoltaicos.** Trabalho de diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Agosto, 2017.
- BROUWER, Karen Ann; GUPTA, Chaya; HONDA, Shelton. **Methods and Concerns for Disposal of Photovoltaic Solar Panels.** 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Science In Engineering, The Faculty Of The Department Of General Engineering, San Jose State University, San Jose, 2011.
- CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos: Características E Associações,** Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, 2010.
- CRUZ, T. P. R.; CARVALHO, L. H. R.; FAVACHO, R. C.; CAMPOS, P. S. S. C.; MORAES, R. I. R.; MORAIS, E. C.; MARQUES, G. T.; CHASE, O. A. **Socio-environmental and legislative analysis of the impacts of solar photovoltaic energy in Brazil.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 8, p. 63497, 2020.
- CUCCHIELLA, F. et al. **End of life of used photovoltaic modules: a financial analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 47 (552-561), 2015.
- CUI, J.; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review.** Journal of Hazardous Materials, v. 99, n. 3, p. 243–263, maio. 2003.
- CUI, J.; ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review.** Journal of Hazardous Materials, v. 158, n. 2–3, p. 228–256. 30 out. 2008.
- DIAS, P.; JAVIMCZIK, S.; BENEVIT, M.; VEIT, H.; BERNARDES, A. M. **Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules.** Waste Management, v. 57, p. 220–225, 2016.
- European Commission DG ENV. **Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEE Directive.** Final Report, 2011.
- GHIZONI, Joana Pauli. **Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil.** Univesidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
- IEA – PVPS - International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme. **Trends 2016 in photovoltaic applications.** Report IEA PVPS T1-30:2016.
- IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. **End-oflife management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies.** Recycling Report IEA-PVPS Task 12, 2018.
- 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.
- Klugmann-Radziemska, E.; Ostrowski, P. **Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules.** Renewable Energy, v. 35, n. 8, p. 1751 – 1759, 2010.
- LISPERGUER et al. **Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels.** Journal of Cleaner Production . Volume 168, pp. 51-59. 1 December 2017.

- MACHADO, Vitor Vila Dewes. **Painéis fotovoltaicos: Caracterização e Reciclagem**. Salão UFRGS: SIC – XXIX salão de iniciação científica da UFRGS, Campus do Vale. 2017.
- MAHMOUDI et al. **End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review resources conservation and recycling**, Volume 146, pp. 1-16. July 2019.
- MARSH, Jacob. **Recycling solar panels in 2018**. EnergySage, 30 de agosto de 2018. Disponível em: < <https://news.energysage.com/recycling-solar-panels/> >.
- MCDONOUGH, M. , BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Refazendo a maneira como fazemos as coisas**. Farrar, Straus e Giroux , Nova York, NY, EUA. 2002.
- MIRANDA, R.; LEANDRO, F.; SILVA, T. **Gestão do fim de vida dos módulos fotovoltaicos**. Revista Brasileira de Energias Renováveis. 2019. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/53355/pdf> >.
- MME – Ministério de Minas e Energia, Secretaria De Geologia, Mineração E Transformação Mineral-Sgm, **A Mineração Brasileira. Produto 27 – Quartzo; Relatório Técnico 37-Perfil Do Quartzo**. Emílio Lobato. Projeto Estal - Projeto De Assistência Técnica Ao Setor De Energia. Agosto 2009.
- OLIVEIRA, S. S. L, **Recuperação de Prata de Células Fotovoltaicas por meio de Lixiviação Ácida e Precipitação**, Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.
- PAIANO, A. **Avaliação de resíduos fotovoltaicos na Itália**. Ronovar. Energia Ren., 41, pp. 99-112. 2015.
- PROENÇA, E.D.R.B. **A energia solar fotovoltaica em Portugal**. Estado da arte e perspectivas de desenvolvimento. Universidade Técnica de Lisboa. Agosto, 2007.
- PUPIN, P. **Avaliação dos Impactos Ambientais de produção de painéis fotovoltaicos através de ACV**. Universidade Federal de Itajubá, 2019.
- PV Cycle. **Annual Report, 2017**. Disponível em . Acesso em: Junho de 2020.
- ROCHA, A. M., **Tecnologias de Geração de Energia Solar**, Relatório de Estágio no âmbito do Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente pela Faculdade de Economia do Porto, 2015.
- RSC - Royal Society of Chemistry, **Chemical Elements**, 2014. Disponível em <[www.rsc.org/www.chemicalelements.com/www.chemistryexplained.com/biomania.com](http://www.rsc.org/www.chemicalelements.com/www.chemistryexplained.com/biomania.com)>.
- SILVA, H. G.; AFONSO, M. **Energia solar fotovoltaica: Contributo para um roadmapping do seu desenvolvimento tecnológico**. IET Working Papers Series. p. 55, 2009.
- SOARES, R. A.. **Logística reversa nos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.
- TAO ; YU. **Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaics modules**. Energy Materials and Sollar Cells. Volume 141, pp. 108 -124. Outubro, 2015.
- VÉRONIQUE MONIER (France). European Commision. Study on Photovoltaic **Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive**. Paris, 2011.
- WAMBACH, K; ALSEMA, E. A. **Life cycle of solar module recycling process**. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 895, 2006.
- WANG, T.-Y. **Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life**. In: ISLAM, M. R.; RAHMAN, F.; XU, W. (Eds.). . Adv. Sol. Photovolt. Power Plants. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 287–317. 2016.
- WILLIAMS, J.; SHU, L. H.; FENTON, R. G. **Analysis of remanufacturer waste streams across product sectors**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 50, n. 1, p. 101–104, 2001.
- YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Recovery of Metals from E-waste**. The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, v. 48, n. 3, p. 3–18, 2009.