

## Ciclo de vida de painel fotovoltaico em cenário brasileiro

Bárbara Anne Dalla Vechia Konzen<sup>1</sup>

Andrea Franco Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais  
barbaradvk@gmail.com

### Resumo

O setor de energia solar cresce exponencialmente no Brasil graças a alta insolação no país, que garante a eficiência do sistema, e ao progresso tecnológico do setor, que facilita e incentiva o acesso da população à aquisição do sistema. Por utilizar de fonte renovável e não emitir gases de efeito estufa em etapa de uso, os sistemas fotovoltaicos são considerados uma alternativa de geração e energia limpa. Contudo, apesar destes benefícios, observa-se que os impactos gerados nas demais etapas, como produção e pós-uso, vêm sendo negligenciados. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desses sistemas são desenvolvidos mundialmente, porém, ainda cabem pesquisas acerca do impacto ambiental de produção e, especialmente, fim de vida desses sistemas em âmbito nacional, para que seja possível conhecer o cenário geral da sustentabilidade dessa alternativa, as implicações de seu fim de vida e obter fundamentação para propor alternativas que mitiguem os possíveis impactos dessas etapas no Brasil. Este artigo aborda resultados parciais investigação realizada em mestrado acadêmico e tem como objetivo aplicar a metodologia de Pereira (2012) para elaborar o inventário do ciclo de vida (ICV). Fundamenta-se na NBR ISO 14040 e revisão bibliográfica para desenvolvimento do ICV e obtenção de dados referentes aos processos, entradas e saídas de material, energia e resíduos em sistemas de produto industriais. Resultados prévios demonstram que grande parte dos materiais utilizados no processo produtivo são importados, e que a reciclagem do sistema depende de tratamentos complexos que ainda demandam maior desenvolvimento. Sendo assim, este trabalho resulta em análise crítica e

inventário do ciclo de vida de sistema de geração e energia solar fotovoltaica, produzido e reciclado no Brasil, com ênfase nas etapas de fim de vida.

**Palavras-chaves:** Energia solar, Painel fotovoltaico, Avaliação do ciclo de vida, Inventário do ciclo de vida, Impacto ambiental.

### Introdução

Na matriz brasileira de capacidade instalada de energia de dezembro de 2019, 2,6% da capacidade total já era de fonte solar. Isso demonstra o crescimento do setor de energia solar, principalmente ao se comparar aos 1,4% de dezembro de 2018 (BRASIL, 2019b). Ainda que a produção de energia solar fotovoltaica utilize de fonte livre de combustíveis fósseis e não emita gases de efeito estufa em período de uso (RAHMAN; ALAM; AHSAN, 2019), etapas de produção, transportes, manutenção, reciclagem ou descarte, podem causar impactos ambientais como qualquer outro produto.

Estudos sobre a vida útil dos painéis solares, preveem grande número de painéis obsoletos na próxima década (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019; MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2019). Isso se dá devido a obsolescência do sistema e ao rápido avanço tecnológico do setor, que produz modelos cada vez mais eficientes. Ademais, de modo geral, os painéis possuem 25 anos de vida útil (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019), equivalente ao usual período de garantia (PORTAL SOLAR, 2020a). Independentemente

disso, geralmente, o sistema continua gerando energia por muito mais tempo, o que demonstra e efemeridade do produto.

O Acordo Setorial de Eletroeletrônicos brasileiro obriga a implementação de sistemas de logística reversa a fabricantes, distribuidores e comerciantes de Produtos Eletroeletrônicos, considerando a participação do consumidor para o retorno dos produtos após o uso (BRASIL, 2019a). Em seu Anexo V, especifica os painéis fotovoltaicos, incluindo-os em sua área de abrangência. O Acordo foi assinado em 31 de outubro de 2019, o que evidencia a relevância da recente discussão e a pertinência de desenvolvimento de pesquisas acerca do fim de vida desses sistemas de geração de energia.

O objetivo deste trabalho é comunicar resultados parciais de dissertação de mestrado, que englobam o inventário do ciclo de vida do sistema e a metodologia empregada. Neste trabalho, utiliza-se do método proposto por Pereira (2012) para a elaboração do inventário, devido a afinidade com a pesquisa e a eficiência da diagramação quanto a organização de informações para a manipulação dos dados.

Assim, considerando-se o avanço do mercado de energia solar fotovoltaica e o potencial energético para emprego do sistema no Brasil, justifica-se a pesquisa acerca dos impactos ambientais do ciclo de vida do sistema, especialmente em cenário pós-uso e as implicações de seu fim de vida.

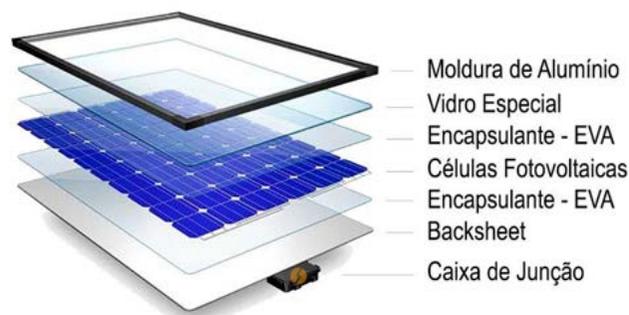
## Fundamentação Teórica

### Composição do Painel fotovoltaico

No Brasil, ainda muitos dos painéis fotovoltaicos instalados são importados (AMBIENTE ENERGIA, 2018). Porém, nos últimos anos, o Governo vem incentivando a produção nacional por meio de financiamentos para produtos produzidos no país (FARIELLO, 2015). Contudo, vale destacar, que para a produção em cadeia nacional, ainda muito dos componentes são importados.

Grande parte dos painéis fotovoltaicos são compostos por um mesmo padrão de materiais, como ilustrado pela Figura 1 a seguir.

**Figura 1: Representação da composição de um modelo genérico de painel fotovoltaico (PORTAL SOLAR, 2020b).**



Sendo assim, este trabalho fundamenta-se na lista de materiais do modelo para o processo produtivo de painel fotovoltaico: vidro solar, EVA (acetato-vinilo etileno), célula fotovoltaica, backsheet, caixa de junção (PORTAL SOLAR, 2020b).

### Revisão Bibliográfica

A partir de revisão bibliográfica englobando estudos recentes, pode-se conhecer o estado da arte das produções acadêmicas referentes a avaliação do ciclo de vida e a reciclagem desse tipo de sistema de geração de energia.

Considerando a especificidade de cada caso, diferentes estudos sobre ACV de sistemas fotovoltaicos demonstram contrastes quanto aos resultados de impacto ambiental. Daqueles que englobam da produção ao fim de vida do sistema (CONSTANTINO *et al.*, 2018; ESKEW *et al.*, 2018; LI, ROSKILLY, WANG, 2018; MAHMUD *et al.*, 2018; OLIVEIRA, TRIGOSO, GASI, 2018; SOULIOTIS *et al.*, 2018; TANNOUS *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018), os impactos ambientais que mais aparecem são a depleção e recursos naturais, em especial em etapa de produção.

Estudos sobre o pós-uso do sistema, permitem perceber que a reciclagem de painéis fotovoltaicos obsoletos influencia diretamente na redução do impacto ambiental na categoria de depleção de recursos naturais quando comparada ao descarte em aterro. De modo específico, outros estudos tratam principalmente de métodos de separação dos materiais, alguns da separação manual dos materiais que compõem o painel (DUFLOU *et al.*, 2018), e outros da separação química (PRADO, 2018; AZEUMO *et al.*, 2019; NEVALA *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2018; PESTALOZZI; EISERT; WOIDASKY, 2018) dos materiais que compõem a célula de silício. Outros estudos

abordam as alternativas de fim de vida (FAIRCLOTH *et al.*, 2019) ou ainda diferentes estratégias de reciclagem (YANG *et al.*, 2019; PRADO, 2018, DIAS, 2015).

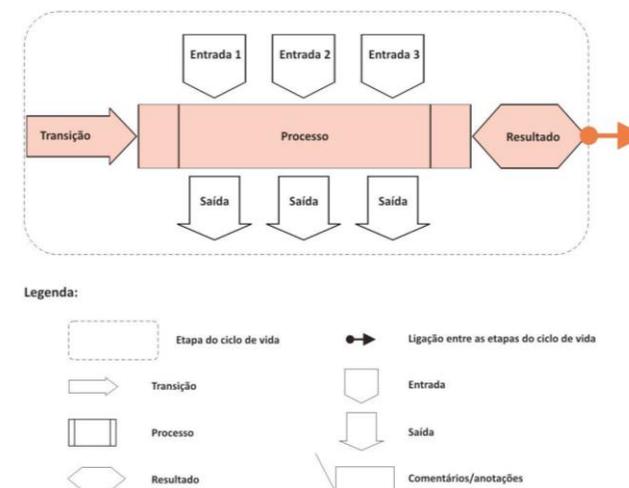
### Metodologia

O método para elaboração do inventário é fundamentado no proposto por Pereira (2012) e pelas orientações da ABNT NBR 14040 (2014).

### Modelo de Sistema Geral

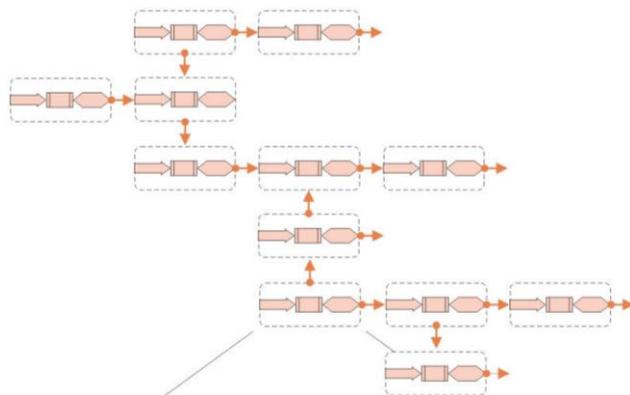
De acordo com orientações propostas por Pereira (2012), o inventário do sistema pode ser organizado a partir de dados gerais para dados mais específicos, em três principais elementos que se repetem: transição, processo e resultado, como representado no Figura 2.

**Figura 2: Modelo de sistema geral de inventário do ciclo de vida: fluxo de entradas e saídas (PEREIRA, 2012).**



Em adição a isso, são determinadas as entradas e saídas de cada processo, onde cada um desses elementos compõe um sistema mais complexo, como demonstrado pela Figura 3 a seguir.

**Figura 3: Modelo de sistema geral de inventário do ciclo de vida (PEREIRA, 2012).**



Deste modo, o inventário do ciclo de vida organiza-se de modo escalonado, podendo ser mais detalhado conforme os objetivos da ACV.

### **Limites do Sistema**

A partir da análise de estudos recentes na área, foi possível identificar a lacuna de pesquisa quanto aos impactos das etapas de fim de vida dos painéis fotovoltaicos. Sendo assim, algumas variáveis foram levadas em consideração para a determinação dos limites do sistema e dos dados a serem coletados para a elaboração do inventário:

- produção nacional, porém com componentes importados da China. Ou seja, montagem do painel no Brasil, e importação dos elementos como vidro, EVA, célula fotovoltaica,

backsheet, caixa de junção, pois tais elementos ainda não são produzidos no Brasil. A moldura de alumínio é o único elemento de produção nacional;

- considera-se que a fase de uso não emite gases de efeito estufa (RAHMAN; ALAM; AHSAN, 2019) e que o sistema não demandará manutenção ao longo dos 25 anos de vida útil;

- fim de vida: desmontagem e reciclagem de elementos como alumínio, vidro e cabeamentos.

Além das alternativas de fim de vida justificadas em revisão bibliográfica, algumas opções alternativas foram buscadas. Em contato com a empresa Descarte Legal, obteve-se informações práticas sobre a situação atual da reciclagem do resíduo eletroeletrônico em Belo Horizonte, Minas Gerais.

A Descarte Legal oferece em seu website informações sobre empresas que prestam serviço de recolhimento e reciclagem dos diferentes tipos de resíduo dependendo de sua localidade. No caso da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos em Belo Horizonte, obteve-se como resultado quatro empresas, porém o contato somente foi correspondido por uma delas, que forneceu as informações necessárias para que fosse possível conhecer parcialmente o cenário da reciclagem desses resíduos.

De acordo com a empresa, atualmente, tal tipologia de resíduo é reciclado parcialmente. Em específico, garante-se a reciclagem do alumínio, por ser de fácil separação dos outros materiais e um método de reciclagem já

comum. Contudo de acordo com a infraestrutura que a empresa possui atualmente e devido à dificuldade de separação, os demais materiais seriam incinerados e/ou destinados a aterros.

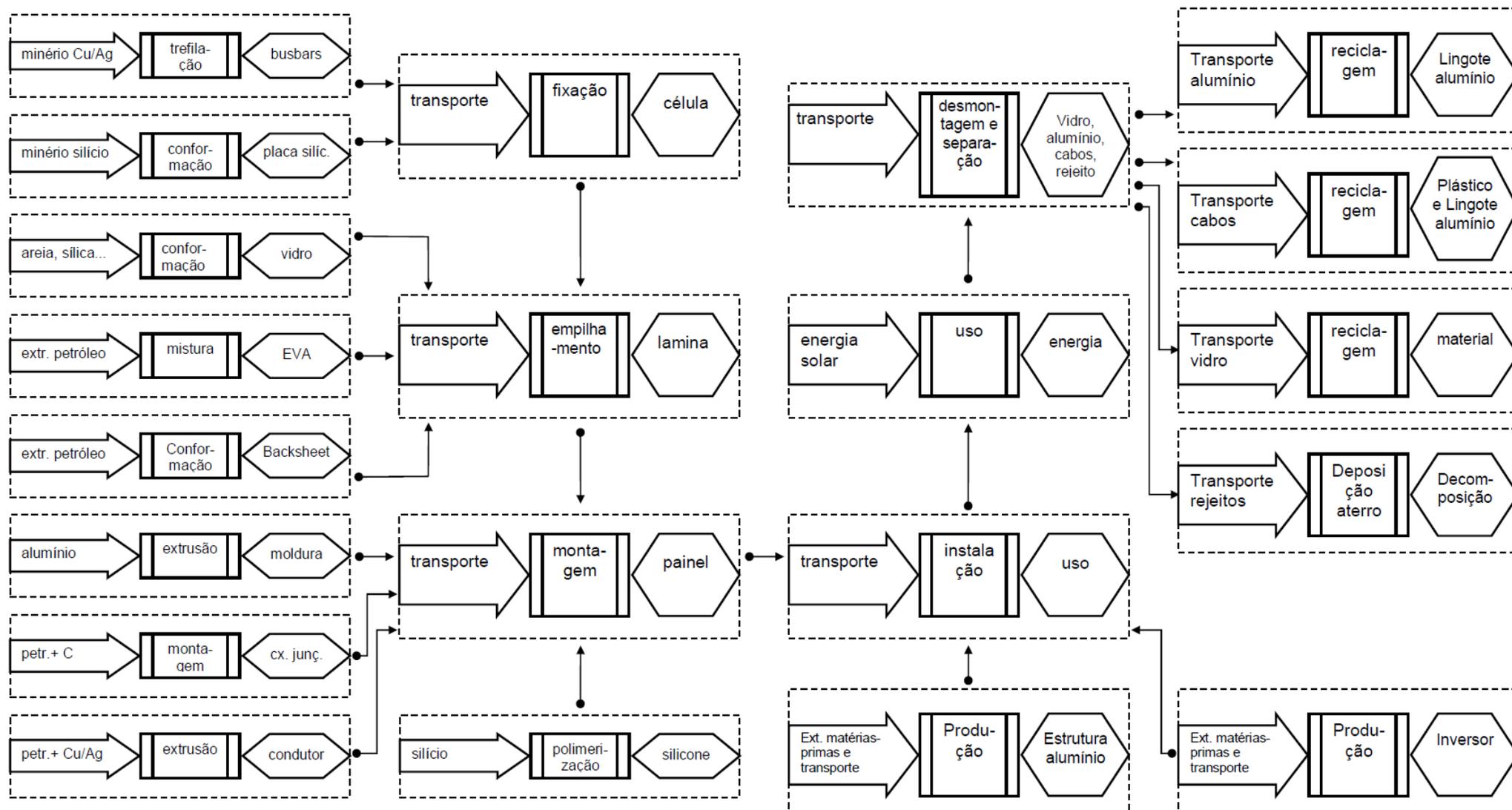
Vale destacar que estudos recentes confirmam a possibilidade de separar o vidro do painel e dos demais materiais como plástico, prata ou cobre dos conectores (LUNARDI *et al.*, 2018), assim como os metais do painel (PRADO, 2018). Entretanto, são processos térmicos e/ou químicos, mais complexos que a separação manual, e por isso, dependem de tecnologia não acessível o suficiente para garantir a reciclagem.

Sendo assim, o limite do sistema analisado incluiu as fases da produção ao pós-uso, dando ênfase às alternativas de fim de vida. Ou seja, a pesquisa foi aprofundada em cenários de separação dos materiais e reciclagem, sendo o inventário mais detalhado nesta etapa.

### **Resultados**

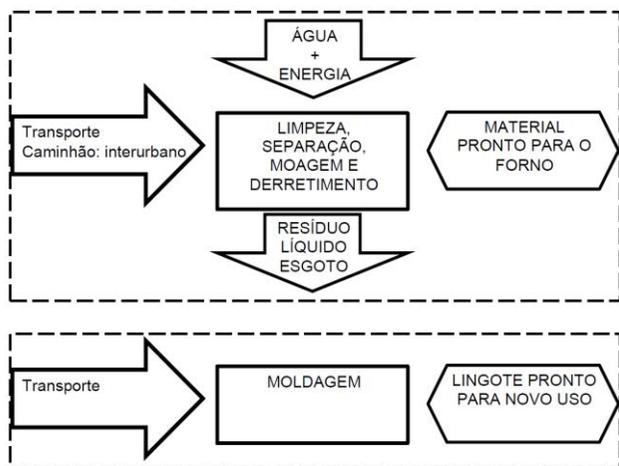
O estudo resultou nos inventários do ciclo de vida da produção, uso e pós-uso do sistema, por meio de levantamento de dados de referência para a simulação em software. Partiu-se de um inventário geral, mais abrangente, contendo as etapas de produção, uso e pós-uso. Posteriormente, foram detalhadas, de modo mais aprofundado as alternativas de fim de vida, tais como a separação e reciclagem ou incineração e depósito em aterro.

Figura 4: Inventário geral do ciclo de vida do sistema (elaborado pelas autoras).

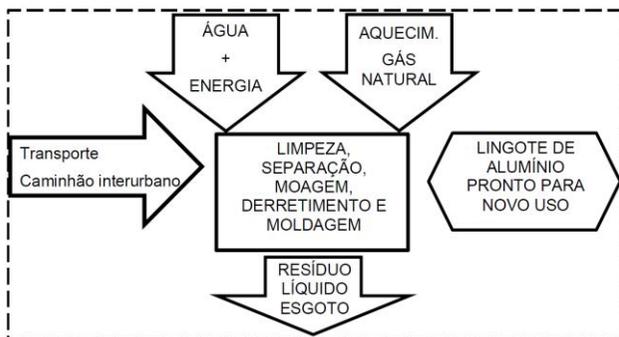


A partir da revisão bibliográfica e consulta a Descarte Legal, foi possível perceber que, na prática, os materiais que podem vir a ser reciclados são materiais usuais em processos de reciclagem, ou seja, vidro, alumínio, plástico e metais. Sendo assim, o modelo de sistema geral do inventário foi detalhado para a reciclagem destes, conforme as Figuras 5, 6 e 7.

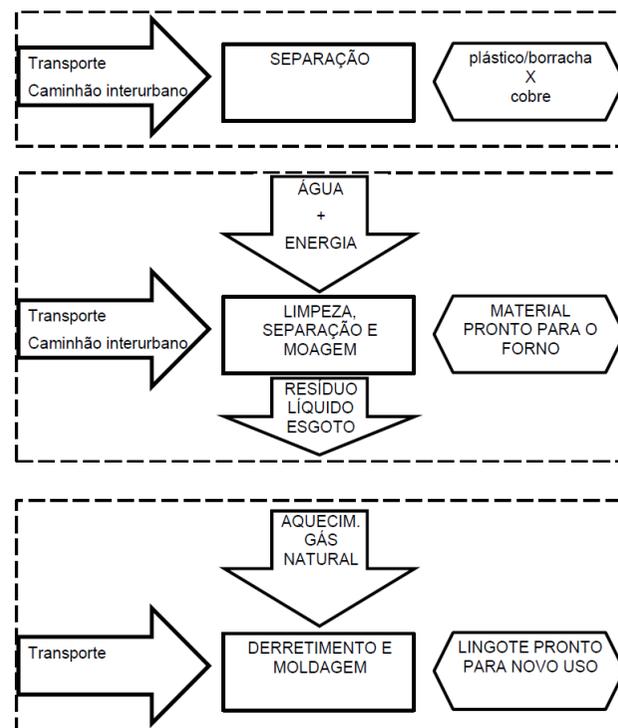
**Figura 5: Reciclagem do vidro (elaborado pelas autoras).**



**Figura 6: Reciclagem do alumínio (elaborado pelas autoras).**



**Figura 7: Reciclagem de fios de cobre e alumínio (elaborado pelas autoras).**



Como confirmam as empresas de reciclagem (DESCARTE LEGAL, 2019), após os processos de limpeza, moagem e derretimento, tanto o vidro como o alumínio e o cobre, resultam em um lingote desse mesmo material, para ser destinado ao seu novo uso. Assim, essas tipologias de materiais, representam ciclos fechados, podendo ser reutilizados como matéria-prima para novo produto.

Não obstante, em razão da complexa separação dos demais materiais que compõem o painel fotovoltaico, sobretudo EVA, célula

fotovoltaica e backsheet, dificilmente estes serão reciclados. Sendo assim, o cenário de fim de vida desses materiais pode ser considerado incineração e destinação a aterros sanitários.

**Conclusões**

De modo geral, percebe-se a área de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos como ainda incipiente no setor. Contudo, iniciativas vêm sendo incentivadas principalmente pelo recente Acordo Setorial de Eletroeletrônicos.

Esta pesquisa buscou evidenciar o progresso tecnológico do setor de energia solar, face às frequentes modernizações e novos modelos de produtos cada vez mais eficientes. Contudo, as alternativas de reuso ou reciclagem dos materiais que compõem o sistema são, ainda, bastante limitadas e demandam pesquisas para que seja possível discutir as implicações de seu fim de vida.

Espera-se que, com o progresso do setor e as recentes cobranças quanto à gestão dos resíduos eletroeletrônicos, nos próximos anos surjam novas alternativas para os cenários e fim de vida desses sistemas. Alternativas estas, que busquem evitar grandes volumes de resíduo descartado e atribuam valor de uso aqueles materiais que possivelmente seriam descartados.

Este estudo fundamenta a elaboração da ACV de painel fotovoltaico produzido e reciclado no Brasil, configurando-se como fase intermediária de dissertação de mestrado, que abordará os resultados da ACV do ICV apresentado.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## Referências bibliográficas

- AMBIENTE ENERGIA. **Impostos geram crise na indústria de painéis solares no Brasil**. 30 nov. 2018. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/11/impostos-crise-industria-painel-solar-fotovoltaico-brasil/35282>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040/2009**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Versão Corrigida: 21.07.2014. Rio de Janeiro, 2014. 22p.
- AZEUMO, Maurianne Flore *et al.* Photovoltaic module recycling, a physical and chemical recovery process. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 193, p.314-319, 2019.
- BRASIL. **Acordo Setorial Eletroeletrônicos**. Ministério do Meio Ambiente. 31 p., out. 2019a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/15652-minist%C3%A9rio-do-meio-ambiente-celebra-acordo-setorial-de-eletoeletr%C3%B4nicos.html>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- BRASIL. **Boletim de Monitoramento do sistema elétrico – dezembro 2019 e dezembro de 2018**. Ministério de Minas e Energia. Boletins de Monitoramento do Sistema Elétrico. 2019b. Disponível em: [mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019](http://mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019). Acesso em: 18 fev. 2020.
- CONSTANTINO, Gabriel *et al.* Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts. **Energies**, v. 11, n. 2806, 28 p., 2018.
- DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos** (Painéis Solares). Orientador. Hugo Marcelo Veit. 2015. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- DESCARTE LEGAL. **Encontre empresas licenciadas para descartar seus resíduos**. 2019. Disponível em: [descartelegal.com](http://descartelegal.com). Acesso em: 12 jun. 2019.
- DUFLOU, Joost *et al.* Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery CIRP Annals. **Manufacturing Technology**, v. 67, p. 29-32, 2018.
- ESKEW, John *et al.* An environmental Life Cycle Assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand. Elsevier, **Renewable Energy**, v. 123, p. 781-792, 2018.
- FAIRCLOTH, Cameron *et al.* The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 143, p. 260-272, 2019.
- FARIELLO, Danilo. Governo cria programa de incentivo à geração de energia solar. **O Globo**. 15 dez. 2015. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/governo-cria-programa-de-incentivo-geracao-de-energia-solar-18302233>. Acesso em 6 mar. 2020.
- LI, Tianqi; ROSKILLY, Anthony Paul; WANG, Yaodong. Life Cycle Sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. **Applied Energy**, v. 227, p. 465-479, 2018.
- LUNARDI, Marina M. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. **Applied Sciences**, v. 8, n. 1396, 15 p., 2018.
- MAHMOUDI, Sajjad; HUDA, Nazmul; BEHNIA, Masud. Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p. 192-205, 2019.
- MAHMUD, Parvez *et al.* Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life Cycle Assessment. **Energies**, v. 11, n. 2346, 21p., 2018.
- NEVALA, Sanna-Mari *et al.* Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. **Waste Management**, v. 87, p. 43-50, 2019.
- OLIVEIRA, André Freitas; TRIGOSO, Federico Bernardino Morante; GASI, Fernando. Eficiência do ciclo de vida energético dos módulos fotovoltaicos no contexto brasileiro. Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação em Energia. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado, RS. **Anais** [...]. Gramado, RS, 2018, não paginado. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens>. Acesso em: 30 jun. 2019.
- PADOAN, Flavia C. S. M.; ALTIMARI, Pietro; PAGNANELLI, Francesca. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. **Solar Energy**, v. 177, p. 746-761, 2019.
- PEREIRA, Andrea Franco. Avaliação do Ciclo de Vida no ambiente construído: importância da modelagem do inventário do ciclo de vida para projeto de produto e arquitetônico. In: RESENDE, M. A. P. (Org). **Tecnologia do Ambiente Construído e Interdisciplinaridade**. 1ed. Belo Horizonte: Instituto de Estudos do Desenvolvimento Sustentável, 2012. ISBN 978-85-62372-14-8.
- PESTALOZZI, Fadri; EISERT, Stefan; WOIDASKY, Jörg. Benchmark Comparison of High Voltage Discharge Separation of Photovoltaic Modules by Electrohydraulic and Electrodynamical Fragmentation. **Recycling**, v. 3, n. 13, 12p., 2018.
- PORTAL SOLAR. **O certificado do painel solar**: saiba o que você está comprando. 2020a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/o-certificado-do-painel-solar---saiba-o-que-voce-esta-comprando.html>. Acesso em 6 mar. 2020.
- PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**. 2020b. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 6 mar. 2020.
- PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. Orientadora: Denise Crocce Romano Espinosa. 2018. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Plitécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- RAHMAN, Mustafizur; ALAM, Chowdhury Sadid; AHSAN, Abir. A Life Cycle Assessment Model for Quantification of Environmental Footprints of a 3.6kWp Photovoltaic System in Bangladesh. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 8, n. 2, p. 113-118, 2019.
- SOULIOTIS, Manolis *et al.* Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications. Elsevier, **Renewable Energy**, v. 126, p. 708-723, 2018.
- TANNOUS, Scarlett *et al.* Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of traditional grid-connected and solar stand-alone street light systems: A case study for rural areas in Lebanon. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 963-977, 2018.
- XU, Liang *et al.* Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011-2016: A life cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 310-329, 2018.
- YANG, H. L. *et al.* Recycling and reuse of kerf-loss silicon from diamond wire sawing for photovoltaic industry. **Waste Management**, v. 84, p. 204-210, 2019.
- ZHANG, Yu *et al.* The microstructure evolution and mechanical properties of MgO-C refractories with recycling Si/SiC solid waste from photovoltaic industry. **Ceramics International**, v. 44, p. 16435-16442, 2018.