

Estudo sobre resíduos fotovoltaicos reutilizados na logística reversa verdeⁱ

Rogério Bonette Klepa

Professor da Fatec Itaquaquetuba
Doutor em Engenharia de Produção pela Uninove
E-mail: klepao@gmail.com

Luciana Cristina Brigatto Fontes

Professora do Colégio Anglo Leonardo da Vinci
Doutora em Tecnologia de Alimentos pela Unicamp
E-mail: lcbfonte@gmail.com

Thadeu Alfredo Farias Silva

Doutor em Engenharia Química pela Unicamp
Pesquisador Colaborador da Unicamp
E-mail: thadeu_efs@yahoo.com.br

Silvério Captureba da Silva Filho

Professor da Uninove
Doutor em Engenharia Química pela Unicamp
E-mail: silveriocsf@yahoo.com.br

Amanda Carvalho Miranda

Professora da UFPE
Doutora em Engenharia de Produção pela Uninove
E-mail: mirandacal@hotmail.com

Recebido: 28 nov. 2022

Aprovado: 24 abr. 2023

Resumo: Este trabalho realiza uma abordagem econômica através da logística reversa verde (LRV) aplicada na reutilização de resíduos de módulos fotovoltaicos. O que mostra indicadores econômicos em um processo lucrativo, com a redução dos efeitos prejudiciais ao meio ambiente.

Palavras-chave: Fotovoltaicos. Logística Reversa Verde. Resíduos.

Abstract: This paper performs an economic approach through green reverse logistics (LRV) applied from the reuse of waste photovoltaic modules. Which shows economic indicators in a profitable process, with the reduction of harmful effects to the environment.

Keywords: Photovoltaics. Green Reverse Logistics. Waste.

Resumen: Este trabajo realiza un abordaje económico a través de la logística inversa verde (LRV) aplicada en la reutilización de módulos fotovoltaicos residuales. Lo cual muestra indicadores económicos en un proceso rentable, con la reducción de efectos nocivos al medio ambiente.

Palabras clave: Fotovoltaica. Logística Inversa Verde. Residuos.

Introdução

Este trabalho teve como objetivo realizar uma abordagem econômica através da logística reversa verde aplicada na reutilização de resíduos de módulos fotovoltaicos, uma vez que esses módulos possuem uma vida útil estimada de aproximadamente 25 anos, e grandes quantidades desse materiais em especial, metais pesados como chumbo e cádmio, serão descartados poluindo o meio ambiente.

A metodologia utilizada foi uma pesquisa totalmente bibliográfica, levando-se em consideração um período de 2016 à 2030, através de busca e coleta de dados e artigos pertinentes ao tema relacionado a logística reversa e fontes de energias renováveis, nas bases de dados Periódicos Capes, *Google Scholar*, *ScienceDirect* (Elsevier), Scielo, *Journal of Cleaner Production*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Renewable Energy*, *Journal of Solar Energy*, e o Ren21. Procurou-se evidenciar aspectos conceituais que caracterizam as células e/ou módulos fotovoltaicas (FV), assim como funcionalidade, descarte, quantidade de resíduos gerados, toxicidade, com foco na sustentabilidade, e possibilidade de utilizar a logística reversa verde nos resíduos FV gerados. Para os cálculos, estimou-se dados apresentado por um período de 2016 à 2030.

Somente para a reutilização de resíduo de silício uma quantidade de 84891 toneladas por período (92,93%), e considerando-se 100% de reaproveitamento, a um preço de US 60,00/kg do silício solar reciclado de acordo com o Centro de Tecnologia Mineral, obtêm-se um retorno financeiro de US 5,093 bilhões.

* * *

A sustentabilidade ambiental não está associada somente à reciclagem, mas ao tripé da sustentabilidade que envolve o ambiental, social e o econômico. São empregadas metodologias para contribuir, uma delas é a logística reversa verde, que analisa e determina o ciclo de vida reverso de materiais ou equipamentos, que podem ser reutilizados.

Miranda et al. (2019) ressaltam a importância de um planejamento voltado tanto para reciclagem quanto a reutilização de resíduos oriundos das principais fontes de energia renováveis, entre elas a fotovoltaica. Pesquisadores, através da metodologia do ciclo de vida e logística reversa de materiais ou equipamentos, observaram a importância de se reutilizar resíduos, devendo-se pensar em como trata-los e reutilizá-los.

Pensando nisso, Klepa et al (2019) desenvolveram um sensor de orientação ao tráfego de rodovias a partir de reutilização de resíduos da construção civil que demonstrou viabilidade econômica e ambiental do processo. Estudo semelhante realizado por Medeiros et al (2019) demonstraram que a manta de asfalto reciclado reduz a perda de calor do telhado entre 68 e 72% e o seu custo com material é de duas a cinco vezes menor que as demais mantas estudadas.

Seguindo-se a lógica, Amanda et al (2018) realizaram estudo tecno-econômico para produção de um biodiesel a partir de resíduos de óleos de frituras, reduzindo-se em mais de 20% as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Durante as últimas décadas, Sampaio et al. (2016) relatam que foram realizadas pesquisadas e desenvolvidos diversos tipos de células solares, empregando-as nos mais variados tipos de materiais para a conversão a energia solar em energia elétrica.

Dentre as diversas células solares desenvolvidas, Chowdhury et al. (2020) e Klepa et al. (2016) informam que os módulos fotovoltaicos (MF) fabricados a partir de silício (Si), continuam a ser comercializados atingindo-se uma porcentagem superior a 85% no mercado, seguido das células de filmes finos (FF) e as voltadas para pesquisa e desenvolvimento (P&D), como células sensibilizadas por corante.

Dados recentes da REN21 (2020) informam que dentre as energias renováveis com maior expressão à nível mundial, a energia solar fotovoltaica (FV) apresentou um crescimento de 20% perante outros 25% apresentado pela energia eólica. Diante desse cenário, à medida que a tecnologia fotovoltaica aumentar, consequentemente também os resíduos FV Dias (2015). Os resíduos podem ser classificados (Classe I) quanto sua periculosidade de acordo com a taxa de limite máximo permitido de acordo com a norma NBR10004.

As placas FV, quando acondicionadas de forma errada, acabam por gerar contaminação e poluição gravíssimos, podendo colocar em risco a saúde, pois possuem metais tóxicos como chumbo, que ataca o sistema nervoso, o cromo e o cádmio, que são carcinógenos, além do que, podem lixiviar os depósitos de lixo eletrônico existentes em fontes de água potável. Pensando-se, no aumento gradual de resíduos gerados por células e/ou módulos fotovoltaicos (MF), este trabalho teve como objetivo fazer um estudo utilizando-se da logística reversa verde aplicando-a na reutilização de resíduos fotovoltaicos.

Revisão de Literatura

Segundo Santiago (2017), a logística tradicional procura acompanhar um fluxo de saída dos produtos, se preocupa com o retorno de produtos, materiais e peças ao processo de produção de uma empresa, sendo considerada uma evolução da logística. A logística reversa (LR) surgiu ao final da década de 70, se refere a todas as atividades logísticas de coletar, desmontar e processar produtos e/ou materiais e peças usados. Agora, para Pereira & Maretti (2017) o termo logística reversa verde (LRV) é aplicado para designar as ações de retorno dos bens e produtos para o destino correto e, compreender a movimentação de materiais reaproveitados para retornar ao processo produtivo de suprimento, produção e distribuição conforme ilustra a Figura 1.

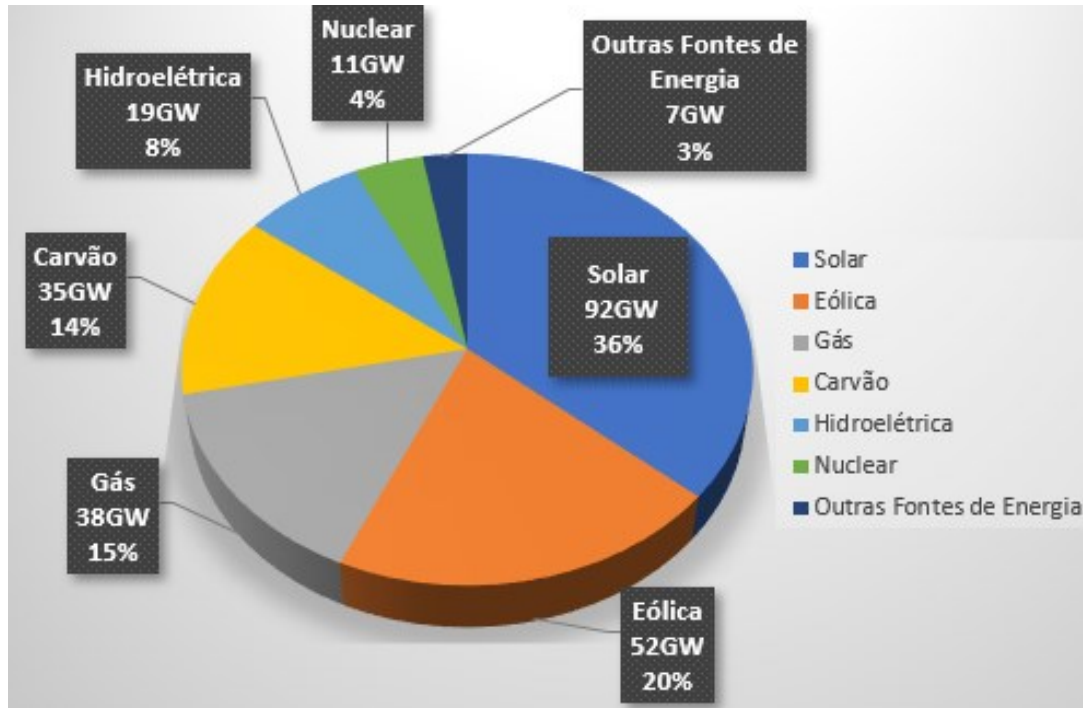


Fonte: Adaptado de Fateclog (2020)

Estima-se, segundo Chowdhury et al. (2020) que os resíduos solares FV atinjam uma taxa de 4 a 14% da capacidade total de geração em 2030. A Capacidade de geração de energia instalada mundialmente em 2017, para algumas fontes de energia é representada através da Figura 2, em destaque a energia solar ocupando 30%.

Segundo Agência de Energia Renovável (IRENA) estimou-se que em 2016 havia 250.000 de toneladas métricas de resíduos de painéis FV. Outro fato preocupante também, é sua composição que apresenta chumbo (Pb), cádmio (Cd) e muitos outros produtos químicos nocivos que não podem ser removidos se o painel FV apresentar rachadura.

Figura 2 – Capacidade de geração de energia instalada mundialmente em 2017



Fonte: Adaptado de Chowdhury et al. (2020)

Através desses fatos, pretende-se realizar um estudo e pesquisa bibliográfica aplicando-se logística reversa verde tendendo uma abordagem correta na reutilização de resíduos FV.

Metodologia

Este artigo foi elaborado através de uma metodologia de pesquisa totalmente bibliográfica, através de busca e coleta de dados de artigos pertinentes ao tema relacionado a logística reversa e fontes de energias renováveis, nas bases de dados Periódicos Capes, Google Scholar, *ScienceDirect* (Elsevier), Scielo, *Journal of Cleaner Production*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Renewable Energy*, *Journal of Solar Energy*, e sites relacionados ao tema abordado como o Ren21. Procurou-se evidenciar

aspectos conceituais que caracterizam as células e/ou módulos fotovoltaicas (FV), assim como funcionalidade, descarte, quantidade de resíduos gerados, toxicidade, com foco na sustentabilidade, e possibilidade de utilizar a logística reversa verde nos resíduos FV gerados.

A pesquisa foi realizada inicialmente com um estudo horizontal da literatura e de documentos públicos, com a finalidade de compreender a estrutura dos módulos e células FV, e a necessidade do uso de energia fotovoltaica na atual realidade mundial. Segundo Irena (2020), pode-se reciclar de 65% a 70% em massa de resíduos FV. Essas estimativas são baseadas no volume acumulado de resíduos de 1,7 milhão de toneladas para 2030.

Estudo recente realizado por De Oliveira (2019) demonstra composição média de elementos químicos em células FV, respectivamente Si (92,93%), metais (7,07%), desses Al (5,75%), Ag (0,69%), Pb (0,05%), Cu (0,01%), Fe (0,01%), outros (0,56%). Pensa-se também, conforme Chowdhury et al. (2020) incentivar a realização de um planejamento sustentável (logística reversa verde) para correta disposição desses resíduos, muitos deles, tóxicos como o chumbo (ataca o sistema nervoso) e cádmio (cancerígeno), além do mais, podem penetrar no solo contaminado lençóis freáticos.

Através destas informações este trabalho objetiva orientar empresas sobre a importância correta no gerenciamento de resíduos FV, muitas vezes tóxicos. Complementa-se também, reduzirem os impactos ambientais gerados pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), aquisição de créditos de carbono (CC), além de reconhecimento socioambiental e sustentável em toda sociedade.

Resultados e discussão

1) Sustentabilidade a partir da reutilização de resíduos fotovoltaicos (FV)

Segundo Matos et al. (2019), afirmam que, a geração de resíduos depositados de forma irregular em terrenos baldios podem contaminar o solo, o ar e a água, provocar inundações e doenças. Dados da Ecycle (2018), relatam que adotando-se práticas de reaproveitamento de resíduos em geral, pode-se conseguir vantagens como:

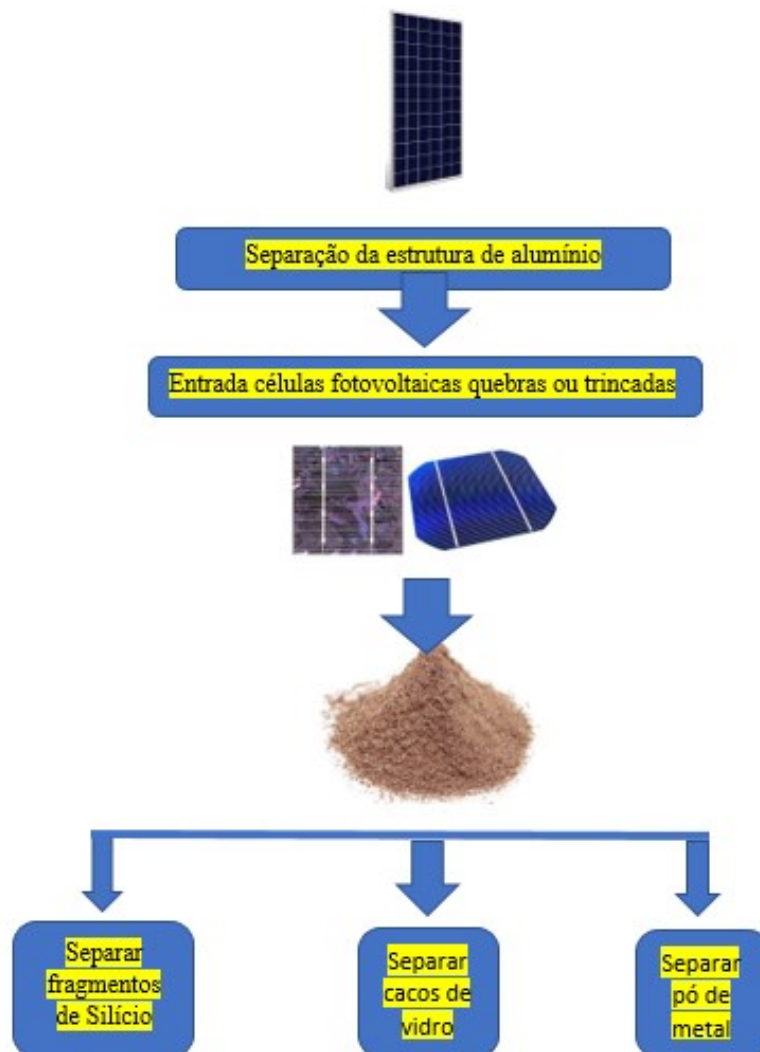
- a-) Evitar a geração e/ou acúmulo de resíduos;
- b-) Reduzir de contaminação do solo pelos metais pesados;

- c-) Diminuir custos industriais mediante a incorporação de resíduos em seus processos produtivos;
- d-) Diminuir a quantidade de resíduos enviados para aterros, diminuindo-se assim os custos com destinação, transporte e multas;
- e-) Economia de energia e recursos naturais;
- f-) Melhoria de imagem da empresa frente ao mercado consumidor (Giraçol et al., 2011; Silva Filho et al., 2018).

2) Fluxograma de reciclagem de resíduos fotovoltaicos (FV)

O fluxograma proposto na Figura 3, foi elaborado a partir de Irena (2020) e Komoto (2014).

Figura 3 – Fluxograma de reciclagem de resíduos fotovoltaico



3) Contabilidade a partir da reutilização de resíduos FV

Assumindo-se, uma quantidade de 250000 toneladas de resíduos fotovoltaicos (FV) gerados em 2016 Chowdhury et al. (2020), e estimados em 1,7 milhões de toneladas até 2030, Irena (2020), levando-se em conta um tempo médio de funcionamento de 30 anos, para os módulos FV, de acordo com os fabricantes.

Estabelecendo-se isso, a uma previsão de (4% - 14%) desses resíduos durante o período analisado, consegue-se elaborar a Tabela 1 que representa os valores de resíduos fotovoltaicos gerados de 2016 à 2030. Paralelo a isso, pode-se realizar um planejamento em conjunto, afim de desenvolver uma logística reversa verde semelhante à Figura 1. Percebe-se também, através de informações a importância do retorno financeiro e sustentável ao empregar metodologias e/ou técnicas de extração de metais pesados, em especial o chumbo e o cádmio.

Tabela 1 – Valores de resíduos fotovoltaicos gerados em 2016 e estimado em 2030.

Ano	Resíduos gerados (t/ano)	Mínimo de resíduos gerados (4%)	Máximo de resíduos gerados (14%)	Média percentual
2016	250000	10000	35000	22500
2030	1700000	68000	238000	153000

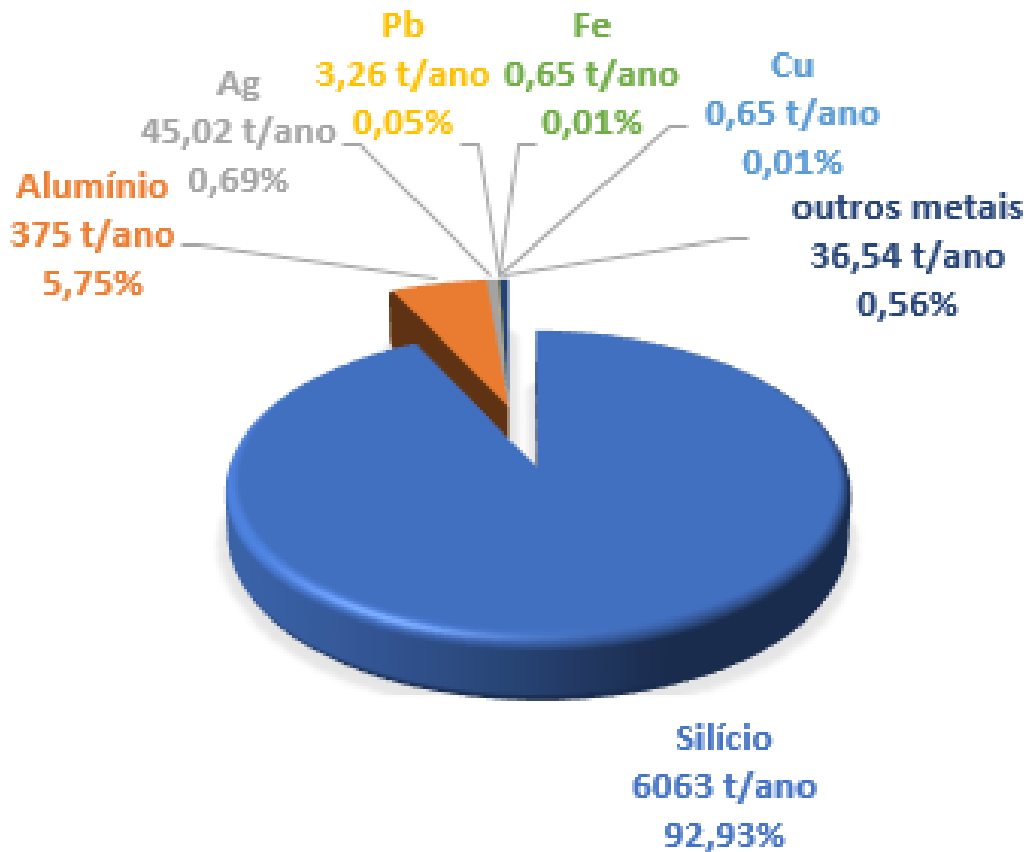
Fonte: Adaptado de dados Chowdhury et al. (2020) e Irena (2020)

Calculando-se a diferença a partir da média percentual (4% a 14%) de resíduos FV gerados durante o período de 14 anos, encontra-se um crescimento de 9321,43 toneladas/ano. Desses deve-se considerar 70% da massa total de resíduos, que é 6525 t/ano comparados à 91350 t /período.

Considerando-se, a massa útil para reciclagem 70% ilustrado na Figura 4, de acordo com Irena (2020), as massas são respectivamente para Si (6063 t/ano), Al (375 t/ano), Ag (45,02 t/ano), Pb (3,26 t/ano), Cu e Fe (0,65 t/ano) e demais elementos (36,54 t/ano).

Estudo realizado por De Oliveira (2017), estima que a concentração de cádmio em células de filme fino seja de 0,07% de massa reutilizável.

Figura 4 – Contribuição dos metais incorporados à massa útil considerada de 70%.



Fonte: Adaptado de Irena (2020)

Considerações finais

Conclui-se, que somente para o silício uma quantidade de 84891 t/ período (92,93%), e considerando-se 100% de reaproveitamento, a um preço de US 60,00/kg do silício solar reciclado de acordo com o Cetem (2020), obtêm-se um retorno financeiro de US 5,093 bilhões. Observa-se que, além da prata comercializada a US 492,00/kg de acordo com GoldPrice (2020), obtêm-se US 310,09 milhões e, para o chumbo (0,05%) a US 1730,00/ton, segundo a Index Mundi(2020), chega-se a um retorno de US 78957.

Além disso, ao incentivar a realização de um planejamento sustentável (logística reversa verde) para correta disposição desses resíduos, muitos deles, tóxicos como o chumbo (ataca o sistema nervoso) e cádmio (cancerígeno), além do mais, podem penetrar no solo contaminado lençóis freáticos. A proposta de reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos demonstrados por este trabalho, determina excelentes indicadores econômicos ao processo, com índice de lucratividade, contribuindo para a redução dos efeitos prejudiciais ao meio ambiente.

Referências

CETEM – **Centro de Tecnologia Mineral**. Série rochas e minerais industriais: Silício grau solar – uma revisão das tecnologias de produção. Ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/series/serie-rochas-e-minerais-industriais/item/2721-silicio-grau-solar-uma-revisao-das-tecnologias-de-producao>>, Acessado em 22 de abr 2020.

CHOWDHURY, Md. Shahariar; RAHMAN, Kazi Sajedur; CHOWDHURY, Tanjia; NUTHAMMACHOT, Narissara; TECHATO, Kuaanan; AKHTARUZZAMAN, Md.; TIONG, Sieh Kiong; SOPIAN, Kamaruzzaman; AMIN, Nowshad. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**. v.27, p. 1- 11, 2020.

ECYCLE. Sua pegada mais leve. Disponível em <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35-atitude/1119-residuos-da-construcao-civil-terao-plano-especifico-de-descarte-com-a-pnrs.html>> Acesso em 23 de abril de 2020.

FATECLOG, Blogisticando – Fatec Rubens Lara – Logística Reversa de Lixo Eletrônico. Disponível em:<http://fateclog.blogspot.com/search/label/Log%C3%ADstica%20Reversa%20de%20Lixo%20Eletr%C3%B4nico>>. Acesso em 20 de abr de 2020.

GIRAÇOL, J.; PASSARINI, K. C.; SILVA FILHO, S. C. da; CALARGE, F. A.; TAMBOURGI, E. B.; SANTANA, J. C. C. Reduction in ecological cost through biofuel production from cooking oils: an ecological solution for the city of Campinas, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p. 1324-1329, 2018.

GOLDPRICE - Gold Price USA - <<https://goldprice.org/pt/gold-price-usa.html>>. Acesso em 23 de abril de 2020.

INDEX MUNDI.< <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=chumbo>>. Acesso em 23 de abril de 2020.

KLEPA, R. B.; DOS PRAZERES, K. C.; SILVA, T. A. F.; SANTANA, J. C. C. Comparação entre os módulos de células fotovoltaicas classificados pelas normas brasileiras. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), p. 1-13, 2016.

KLEPA, R. B.; MEDEIROS, M. F.; FRANCO, M. A. C.; TAMBERG, E. T.; FARIAS, T. M. de B.; FILHO, J. A. P.; BERSANETI, F. T., SANTANA, J. C. C. Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control. **Journal of Cleaner Production**. v. 209, p. 250-258, 2019.

KOMOTO, K. Developments on PV Recycling in Japan, **Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Hamburg, 2014.

MATOS, J. P. C.; DE ALENCAR, T. C. S. B. D. Gerenciamento de resíduos sólidos e a aplicação da logística reversa no segmento da construção civil. *Id on Line Rev. Mult. Psic.* v.13, n. 43, p. 784-807, 2019.

- MEDEIROS, M. F.; FRANCO, M. A. C.; KLEPA, R. B.; SANTANA, J. C. C. Economic viability of a thermal blanket produced from asphalt waste used in roof covering. **Revista Matéria** (Rio de Janeiro), v.24, n°4, e-12511, p. 1-13, 2019.
- MIRANDA, A. C.; FILHO, S. C. da S.; TAMBOURGI, E. B., SANTANA, J. C. C.; VANALLE, R. M.; GUERHARDT, F. Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.88, p. 373-379, 2018.
- MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. da S.; CAETANO SILVA, T. Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v.8, n.1, p. 364- 383, 2019
- PEREIRA, G. H.; MARETTI, M. C. Logística reversa de óleo vegetal: uma perspectiva socioambiental. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**. p. 1-13, v. 33, n. especial, 2017.
- REN21 – Renewables Now – Global overview – Introduction 2018. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/> Acesso em 19 abril de 2020.
- SAMPAIO, D. M.; THIRUMAL, E; DE BARROS, A. L.F. The effect of photo-anode surface morphology and gel-polymer electrolyte on dye-sensitized solar cells with natural dyes. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. v.27, p. 9953–9961, 2016.
- SANTIAGO, B. H. de S. A logística reversa como estratégia de competitividade. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p.20-28, 2017.
- SILVA FILHO, S. C.; MIRANDA, A. C.; FARIAS, T. M. de B.; CALARGE, F. A.; SOUZA, R. R. de; SANTANA, J. C. C.; TAMBOURGI, E. B. Environmental and techno-economic considerations on biodiesel production from waste frying oil in São Paulo city. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 1034-1043, 2018.

ⁱ Uma primeira versão deste trabalho – intitulado *Potencial de resíduos fotovoltaicos reutilizados através da logística reversa verde (LRV)* – foi apresentada no ENEGEP 2020.