

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE GESTÃO E NEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

Mário Fehr Yemail

Sustentabilidade energética:
O processo de destinação das placas fotovoltaicas - um estudo na região de
Uberlândia

Uberlândia

2026

MÁRIO FEHR YEMAIL

Sustentabilidade energética:

**O processo de destinação das placas fotovoltaicas - um estudo na região de
Uberlândia**

Dissertação de mestrado apresentada como
requisito para conclusão do Programa de Pós-
Graduação em Gestão Organizacional da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Gestão Empresarial

Orientador: Prof. Dr. Márcio Lopes Pimenta

Uberlândia

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

Y44s
2026

Yemail, Mário Fehr, 1973-
Sustentabilidade energética [recurso eletrônico] : o processo de
destinação das placas fotovoltaicas - um estudo na região de Uberlândia /
Mário Fehr Yemail. -- 2026.

Orientador: Márcio Lopes Pimenta.
Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade Federal de
Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Gestão Organizacional.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11028>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Administração. I. Pimenta, Márcio Lopes, 1977-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Gestão Organizacional. III. Título.

CDU: 658

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Gestão
Organizacional

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1F, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34) 3291-6333 - www.ppggo.fagen.ufu.br - ppggo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Gestão Organizacional				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Profissional, 146, PPGGO				
Data:	Quatorze de Julho de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:20
Matrícula do Discente:	12412GOM010				
Nome do Discente:	Mário Fehr Yemail				
Título do Trabalho:	Sustentabilidade energética: O processo de destinação das placas fotovoltaicas - um estudo na região de Uberlândia				
Área de concentração:	Gestão Organizacional				
Linha de pesquisa:	Gestão Empresarial				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	-				

Reuniu-se, de forma híbrida, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Gestão Organizacional, assim composta: Professores Doutores: Peterson Elizandro Gandolfi (UFU), Paulo Renato de Sousa (FDC) e Marcio Lopes Pimenta, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcio Lopes Pimenta, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação

interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Márcio Lopes Pimenta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/07/2026, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Peterson Elizandro Gandolfi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/07/2026, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Renato de Sousa, Usuário Externo**, em 15/07/2026, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7413566** e o código CRC **AA5BC112**.

Referência: Processo nº 23117.040365/2026-11

SEI nº 7413566

“Uma pessoa que nunca cometeu um erro
nunca tentou nada de novo.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTO

Agradeço a meus familiares que estiveram sempre presentes nesta jornada, me incentivando a continuar, em especial a minha esposa, Dra. Lara Cristina, pela compreensão e incentivo, e a meu pai, Manfred Fehr, pela inspiração.

Agradeço também aos colegas de curso que foram importantes nas etapas das disciplinas e na motivação para não desistir.

Por fim, agradeço aos professores que tornaram este momento possível, em especial ao professor Márcio que, apesar da correria, sempre respondeu rapidamente, me incentivou e orientou desde antes do começo.

RESUMO

O crescimento da energia fotovoltaica impõe o desafio da destinação sustentável dos painéis em fim de vida útil (EOL) ou com descarte antecipado. Esta pesquisa analisa como os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia (MG). Adotou-se uma abordagem qualitativa exploratória, com 15 entrevistas qualitativas junto a integradores, distribuidores, gestores de resíduos e recicladores, analisadas via análise de conteúdo. Os resultados apontam que a logística reversa tradicional enfrenta gargalos significativos, como dispersão geográfica dos sistemas, altos custos de transporte e falta de atratividade econômica inicial, levando ao acúmulo de resíduos e riscos ambientais por metais pesados. Como principal contribuição teórica, o estudo expande o conceito de CCS — historicamente restrito ao setor agroalimentar — para a gestão de resíduos tecnológicos e logística reversa de alto valor agregado. Como contribuição prática, desenvolveu-se um framework composto por uma Matriz de Transição e propostas de Ações Estratégicas que norteiam empresas e políticas públicas na estruturação de modelos de negócios regionais rentáveis. Este framework tem foco na regionalização da reciclagem, uso de unidades móveis, reuso funcional/energético e integração de mercados locais. As implicações práticas demonstram que as CCS reduzem substancialmente o custo total de propriedade no descarte, eliminam fretes longos e viabilizam o ecossistema regional de reciclagem. Conclui-se que as CCS constituem um mecanismo operacional e econômico estratégico para fortalecer a economia circular e preparar a cadeia estudada para o crescimento exponencial de descartes previsto para as próximas décadas.

Palavras-chave: módulos fotovoltaicos em fim de vida (EOL), logística reversa, cadeias curtas de suprimentos, economia circular, sustentabilidade

ABSTRACT

The growth of photovoltaic energy imposes the challenge of sustainable disposal of end-of-life (EOL) or early-discarded panels. This research examines how the principles of Short Supply Chains (SSC) can be mobilized to structure regional reverse logistics and enable the reuse of photovoltaic waste in the context of Uberlândia (MG). An exploratory qualitative approach was adopted, comprising 15 qualitative interviews with integrators, distributors, waste managers, and recyclers, analyzed through content analysis. The results indicate that traditional reverse logistics faces severe bottlenecks, such as the geographic dispersion of systems, high transportation costs, and a lack of initial economic attractiveness, leading to waste accumulation and environmental risks from heavy metals. As the main theoretical contribution, the study expands the SSC concept—historically restricted to the agri-food sector—to the management of technological waste and high-value-added reverse logistics. As a practical contribution, a framework was developed, consisting of a Transition Matrix and proposed Strategic Actions that guide companies and public policies in structuring profitable regional business models. This framework focuses on the regionalization of recycling, the use of mobile units, functional/energetic reuse, and the integration of local markets. Practical implications demonstrate that SSCs drastically reduce the total cost of ownership in disposal, eliminate long-distance freight, and enable a viable regional recycling ecosystem. In conclusion, SSCs constitute an indispensable operational and economic mechanism to strengthen the circular economy and prepare the studied supply chain for the exponential growth in discards predicted for the coming decades.

Keywords: End-of-Life (EOL) Photovoltaic Modules, Reverse Logistics, Short Supply Chains, Circular Economy, Sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição de uma célula de silício cristalino	19
Figura 2 - Estrutura típica de um painel fotovoltaico C-Si	22
Figura 3 - Distribuição de material em painéis solares c-Si de acordo com o peso	23
Figura 4 - Distribuição de materiais em painéis solares c-Si de acordo com o valor econômico	24
Figura 5 - Modelo Conceitual do Fluxo da Cadeia Curta Fotovoltaica	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de artigos técnicos sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos	28
Quadro 2 - Lista de artigos de gestão sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos ...	32
Quadro 3 - Lista de artigos sobre short supply chain	41
Quadro 4 - Matriz de Consistência Metodológica	57
Quadro 5 - Processos de Gestão em Cadeias de Suprimentos	58
Quadro 6 - Aspectos Operacionais das cadeias abordadas.....	69
Quadro 7 - Matriz Ação x Impacto para Cadeia Curta	96
Quadro 8 - Matriz de Transição: Gargalos da Cadeia Comum vs. Soluções na Cadeia Curta	98
Quadro 9 - Proposta de ações para implementação de cadeias curtas de reciclagem	103

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Objetivos.....	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
1.2 Justificativa.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Material fotovoltaico – números e a importância da reciclagem.....	18
2.1.1. Literatura técnica sobre reciclagem de placas fotovoltaicas	27
2.1.2. Literatura sobre reciclagem de placas fotovoltaicas na perspectiva de gestão	31
2.2. Economia Circular, Cadeias Curtas de Suprimentos e Desenvolvimento de Produtos Circulares	35
2.2.1. Economia Circular e Desenvolvimento de Produtos Circulares	36
2.2.2. Literatura sobre cadeia curta.....	39
2.2.3. Literatura sobre cadeia curta na perspectiva de reciclagem	44
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
3.1. Coleta de Dados.....	46
3.1.1. Roteiro para integradores:	51
3.1.2. Roteiro para empresa de reciclagem:.....	52
3.1.3. Roteiro para distribuidores	52
3.1.4. Aspectos Éticos da Pesquisa.....	53
3.2. Análise de dados	54
3.3. Qualidade da pesquisa	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1. Explicação das categorias.....	57
4.2. Aspectos de gestão em cadeias comuns e cadeias curtas	58
4.3. Aspectos Operacionais das cadeias abordadas	68

4.3.1.	Destinação	69
4.3.2.	Motivos de defeito	76
4.3.3.	Processo de Reciclagem	79
4.3.4.	Ambiente Regulatório, Políticas Públicas e Desafios de Conformidade	87
4.4.	Análise de Impactos Sistêmicos e Integração da Cadeia Reversa.....	89
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5.1.	Implicações Teóricas	101
5.2.	Implicações Práticas	102
5.3.	Limitações de Estudo	103
5.4.	Sugestões para Pesquisas futuras.....	105
REFERÊNCIAS		107
APÊNDICES		114

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de fontes renováveis tem ganhado cada vez mais espaço na matriz energética mundial, destacando-se a conversão da radiação solar em eletricidade por meio de módulos fotovoltaicos: a tecnologia solar fotovoltaica. Para compreender a dimensão do avanço dessa tecnologia e os impactos ambientais de longo prazo, destaca-se o estudo *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*, um relatório global pioneiro desenvolvido conjuntamente pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e pelo Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica da Agência Internacional de Energia (IEA-PVPS) (IRENA; IEA-PVPS, 2016), documento que apresenta as primeiras estimativas em escala global sobre os ciclos de vida e o volume futuro de resíduos de módulos solares.

De acordo com o estudo, a capacidade instalada global projetada, que em 2015 era de 222 gigawatts (GW), atingirá 4.500 GW até o ano de 2050, representando 16% da demanda mundial de energia (IRENA; IEA-PVPS, 2016). Este crescimento exponencial previsto pelo estudo tem se comprovado na realidade: dados recentes indicam que a capacidade instalada global saltou e já ultrapassou a marca de 1.185 GW em 2022 (Al Zaabi; Ghosh, 2024; Ndalloka et al., 2024).

LIM et al. (2022) informam que, apesar de não ser poluente durante a fase de produção de energia, não produzindo dióxido de carbono ou ruídos, as preocupações com os resíduos fotovoltaicos vão além de sua fabricação e transporte. Para que essa matriz assegure seu caráter sustentável e de fato renovável, a cadeia fotovoltaica enfrenta um desafio iminente, não apenas para tratar os módulos avariados ou aqueles oriundos de descarte antecipado, mas principalmente em relação ao fim de vida útil (End-of-Life - EOL) de seus equipamentos (Al Zaabia; Ghosh, 2024).

Com uma vida útil estimada em aproximadamente 25 anos (Pedroso; Santos; Pires, 2023), o estudo da IRENA alerta que o volume de resíduos fotovoltaicos gerados globalmente saltará vertiginosamente, podendo chegar a 78 milhões de toneladas até 2050 (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

O relatório da IRENA (2016) indica que a reciclagem dos painéis fotovoltaicos pode destravar um grande estoque de matéria-prima e outros componentes valiosos, sendo então uma alternativa importante. Adicionalmente, as preocupações com o tratamento dos

resíduos fotovoltaicos residem não apenas no seu grande volume, mas na presença de materiais de alto valor agregado, como prata, cobre e silício (EL-KHAWAD; BARTKOWIAK; KÜMMERER, 2022), ao mesmo tempo em que demanda o manejo seguro de substâncias nocivas e potencialmente tóxicas presentes na composição dos módulos, como o chumbo e estanho (Vinayagamoorthi et al., 2024).

Diante das projeções apresentadas pelo estudo, torna-se evidente que a adoção de estratégias de reciclagem e o fomento da economia circular são ferramentas indispensáveis para mitigar a poluição ambiental e garantir a sustentabilidade do setor nas próximas décadas (Vinayagamoorthi et al., 2024).

Acompanhando a tendência mundial, a energia solar fotovoltaica tem ganhado enorme representatividade na matriz energética brasileira. O crescimento acelerou significativamente a partir de 2015, período em que o setor superou a marca de mil conexões em um único ano, ultrapassando a marca de 2,4 milhões de sistemas conectados e uma potência instalada superior a 27,7 GW até março de 2024 (ANEEL, 2024), sendo que somente o ano de 2023 respondeu pelo acréscimo de mais de 625 mil sistemas de geração distribuída. Esse mercado robusto sustenta-se por meio de uma rede de mais de 26 mil empresas integradoras ativas, com 44% de sua concentração localizada na Região Sudeste (ANEEL, 2024).

Consequentemente, o Brasil também precisa se preparar para lidar com um alto volume de descarte. As projeções da IRENA (2016) apontam para a geração de cerca de 550 mil toneladas de resíduos de módulos nas próximas três décadas.

Apesar do volume iminente de descarte, o país ainda carece de uma legislação específica direcionada para o ciclo de vida final desses componentes. O descarte tem sido pautado de forma mais ampla pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos a Lei nº 12.305 (Brasil, 2010) que estabelece a responsabilidade compartilhada para evitar que esses materiais sejam destinados incorretamente aos lixões, prevendo um incentivo à coleta seletiva, à reciclagem e à logística reversa (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024).

Atualmente, está sendo discutida com o mercado no Brasil a regulamentação da logística reversa dos painéis solares e armazenamento por meio de projetos de lei recentes focados no setor fotovoltaico, como o PL 3.784/2023, que busca incluir os painéis solares na regulamentação de logística reversa da Lei 12.305/2010 (Greener, 2024), mas que ainda permanecem em tramitação e aguardando definições de audiência pública desde

outubro de 2023. Essa lacuna normativa e a dispersão logística geram altos custos operacionais de transporte e armazenamento, atuando como um desincentivo econômico para que integradores e distribuidores operacionalizem o fluxo reverso de maneira eficiente.

A urgência desse debate já se reflete na prática do setor: dados do Estudo Estratégico de Geração Distribuída revelam que, apesar de o volume ainda ser pequeno no Brasil, 29% dos integradores brasileiros já tiveram experiência com módulos fotovoltaicos quebrados ou defeituosos ao longo de 2023, com intensificação do acompanhamento e das análises de descarte por parte das empresas no segundo semestre daquele ano (Greener, 2024)

No cenário nacional, o município de Uberlândia (MG) ganha destaque com uma adoção expressiva da tecnologia fotovoltaica, somando mais de 17 mil sistemas conectados e 160 MW de potência instalada (Aneel, 2024).

Dado o expressivo volume local de instalações, a destinação dos resíduos fotovoltaicos esbarra na falta de infraestrutura para o recebimento, triagem e reciclagem regional. Somando-se a inviabilidade econômica gerada pelas longas distâncias da logística reversa tradicional, que resultam no acúmulo inadequado de resíduos nos pontos de geração ou no descarte incorreto no meio ambiente (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024).

Diante desse gargalo, o conceito de Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) - caracterizado pela aproximação física e social entre os agentes econômicos e pelo fortalecimento dos mercados locais desponta como uma alternativa estratégica para descentralizar e estruturar a logística reversa regional (Kiss et al., 2019; Jarzębowski et al., 2020; Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024).

As cadeias curtas, em consonância com o crescente interesse científico e econômico por circuitos curtos e sustentabilidade, ganham importância nos sistemas de gestão de logística reversa ao reduzirem as distâncias percorridas, diminuïrem os custos de transporte, mitigarem a emissão de gases de efeito estufa, viabilizarem o desenvolvimento de subprodutos baseados nos componentes reciclados e gerarem empregos locais pela proximidade com a matéria-prima e os consumidores, aspectos que estão em consonância com as metas de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (Kiss; Ruskai; Takács-György, 2019).

Contudo, a literatura atual aborda majoritariamente as tecnologias físicas e químicas de reciclagem, evidenciando uma lacuna no que tange à gestão da logística reversa em base regional e à integração sob a ótica de cadeias curtas (Wang et al., 2022; Chowdhury et al., 2020).

Considerando a necessidade de viabilizar a reciclagem regional e rotas locais para evitar que os resíduos fotovoltaicos acabem em aterros sanitários e para fomentar a economia circular regional, focando na gestão e implementação de tecnologia para ganho de eficiência e sustentabilidade, o presente estudo pode incentivar empreendedores nacionais e regionais a investirem nas cadeias curtas relacionadas com os resíduos fotovoltaicos e busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: Como os princípios das cadeias curtas de suprimento podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia, com ênfase na reciclagem, no desenvolvimento de produtos e no comércio regional?

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar como os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para o atingimento do objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Mapear a situação atual de destinação dos resíduos de placas fotovoltaicas na região de Uberlândia por meio da condução de entrevistas semiestruturadas com integradores locais, distribuidores e recicladores que atendem ou possam atender a região.
- b) Identificar, a partir da análise de conteúdo e categorização temática dos dados coletados em campo, as oportunidades de processamento regional e os produtos que podem vir a ser produzidos a partir dos componentes das placas fotovoltaicas ou que tenham componentes semelhantes aos presentes nas placas fotovoltaicas.
- c) Propor um framework prático (Matriz de Transição e Ações Estratégicas) que utilize os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos para mitigar custos logísticos e fomentar a economia circular dos resíduos fotovoltaicos no contexto regional.

1.2 Justificativa

O número crescente de usinas fotovoltaicas instaladas em nível mundial e no Brasil traz consigo uma preocupação iminente sobre a destinação adequada das placas ao fim de sua vida útil (End-of-Life - EOL) ou em casos de descarte antecipado por avarias (IRENA; IEA-PVPS, 2016). Diante de projeções que apontam para a geração de cerca de 550 mil toneladas de resíduos de módulos nas próximas três décadas no país (IRENA; IEA-PVPS, 2016), do alto valor comercial e do potencial de toxicidade ambiental dos componentes das placas (Vinayagamoorthi et al., 2024) e tendo em vista o conceito de

sustentabilidade que envolve este mercado, a viabilização da logística reversa esbarra em um gargalo operacional: a dispersão geográfica dos sistemas e a centralização da infraestrutura de tratamento, que geram custos inviáveis para fretes de longa distância (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024). Dessa forma, este estudo se justifica pela necessidade de propor alternativas estruturais descentralizadas que permitam viabilizar economicamente a circularidade desse mercado, mitigando os impactos ambientais associados ao descarte linear inadequado e ao transporte inter-regional (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024; Kiss; Ruszkai; Takács-György, 2019).

Do ponto de vista prático, a relevância desta pesquisa se consolida ao analisar o município de Uberlândia (MG) como laboratório regional de Geração Distribuída. Uberlândia destaca-se nacionalmente com uma adoção expressiva de sistemas solares, somando mais de 17 mil usinas conectadas e 160 MW de potência instalada (ANEEL, 2024). Contudo, a destinação local de resíduos fotovoltaicos enfrenta um impasse logístico crítico: a ausência de infraestrutura regional de processamento força os integradores a acumular os componentes em seus estoques ou a arcar com fretes proibitivos para enviar volumes pulverizados até a planta de reciclagem ativa mais próxima, situada em Valinhos (SP). Ao avaliar a viabilidade de um modelo de Cadeia Curta de Suprimentos (CCS) nesse cenário, este trabalho oferece alternativas logísticas e de destinação regionalizada que servem como um modelo conceitual replicável para outras regiões em rápido crescimento no Brasil.

No âmbito acadêmico, identifica-se uma clara lacuna na literatura científica que justifica a abordagem integrada aqui proposta. Os estudos existentes sobre resíduos solares concentram-se predominantemente em aprimorar tratativas técnicas de reciclagem — como processos químicos, térmicos e físicos em ambiente de laboratório (Wang et al., 2022; Nevala et al., 2019), relegando a segundo plano a gestão estratégica e logística da cadeia reversa e sua viabilidade financeira (Chowdhury et al., 2020). Em contrapartida, as pesquisas sobre Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) são historicamente restritas ao setor agroalimentar e à agricultura familiar (Paciarotti; Torregiani, 2021; Aguiar; Delgrossi; Thomé, 2018).

Assim, a contribuição teórica deste estudo reside em conectar essas duas vertentes, expandindo as fronteiras da teoria de CCS para a gestão de resíduos tecnológicos de transição energética e de alto valor agregado (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024). Ao fazer isso, a pesquisa demonstra teoricamente como a adoção de CCS pode atuar como

um mecanismo de transição para a economia circular no setor de energia solar, mitigando custos de transporte e otimizando recursos por meio da regionalização da reciclagem, permitindo o desenvolvimento da economia local, gerando trabalho e renda (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024; Kiss; Ruskai; Takács-György, 2019).

Por fim, a pesquisa entrega uma contribuição prática e social tangível ao propor uma "Matriz de Transição" e um conjunto de ações estratégicas estruturadas para o reuso e a reciclagem regional (Greener, 2024). Essas ferramentas buscam sanar a dor atual de integradores que não contam com caminhos formais de descarte e, ao mesmo tempo, fornecem subsídios para que gestores municipais e estaduais formulem políticas públicas de fomento a consórcios de coleta compartilhada (*milk run*) e hubs locais. Esse modelo visa manter o conceito de sustentabilidade não só no uso da fonte fotovoltaica, mas também na tratativa de seus resíduos ao fim da vida útil, envolvendo toda a cadeia e ciclo dos produtos para manter o valor econômico, a geração de empregos e a sustentabilidade ambiental retidos na própria economia regional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Material fotovoltaico – números e a importância da reciclagem

A destinação adequada dos resíduos fotovoltaicos representa um desafio de natureza multidimensional, que integra a complexidade física dos materiais à viabilidade de sua gestão logística e financeira (Vinayagamoorthi et al., 2024; Chowdhury et al., 2020). Sob a ótica socioambiental e tecnológica, a preocupação se justifica pelo expressivo volume projetado — que pode atingir 78 milhões de toneladas globais até 2050 — e pelos riscos de contaminação por metais pesados e substâncias nocivas presentes na estrutura dos módulos (Irena; IEA-PVPS, 2016; Vinayagamoorthi et al., 2024). Contudo, sob a perspectiva da gestão de operações, o sucesso de uma transição para a economia circular depende de arranjos logísticos eficientes e de modelos de negócios estruturados capazes de atenuar a assimetria de custos do processo de reciclagem (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024; El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Desse modo, antes de avançar sobre os modelos de gestão e a logística reversa regional, faz-se indispensável compreender a própria composição física e a distribuição de valor dos materiais que estruturam as placas, uma vez que essas características técnicas ditam a viabilidade econômica de toda a cadeia (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022; Bianchin, 2025)

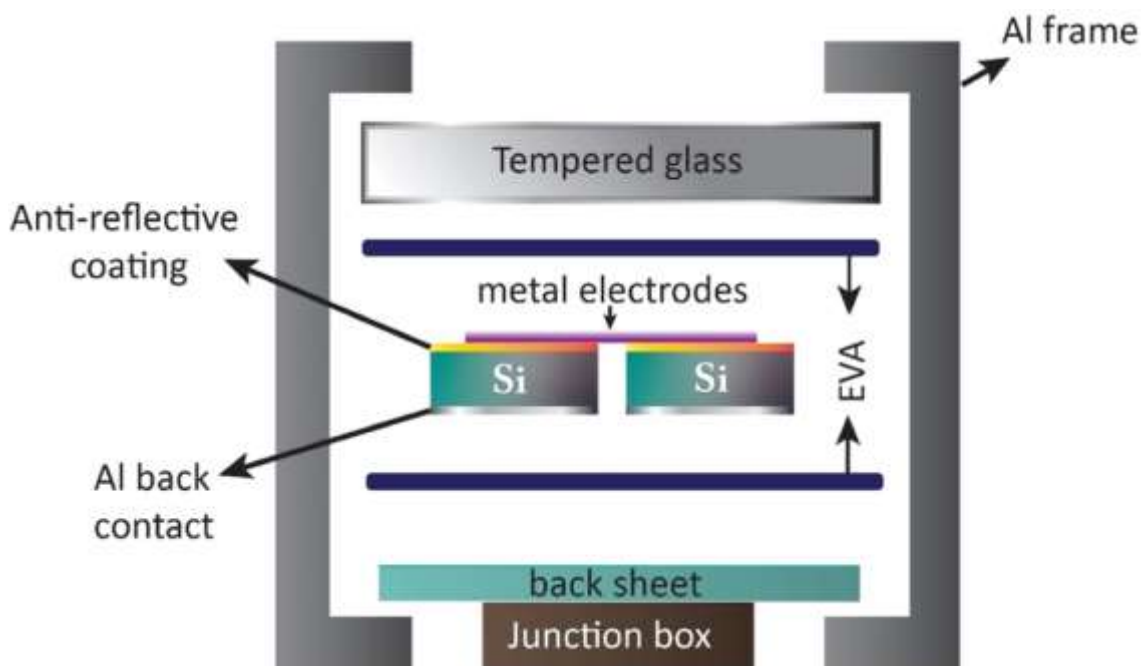
Segundo Vinayagamoorthi (2024), os painéis fotovoltaicos podem ser divididos em três gerações:

A primeira geração era composta basicamente de células de silício com eficiência inicialmente de 6% e chegando a atingir até 26,7%.

O módulo fotovoltaico comercial contém aproximadamente 75% do peso total da superfície do módulo (vidro), 10% de polímero (difluoreto de polivinilideno (PVDF) e acetato de etileno vinila (EVA)), 8% de alumínio (na forma da estrutura), 5% de silício (célula solar), 1% de cobre (interconectores) e 0,1% de prata (linhas de contato) e o restante é composto por outros metais como estanho e chumbo. As células são interconectadas eletricamente (com abas), criando uma sequência de células em série (60 ou 72 células são os números padrão usados) e montadas em módulos para gerar eletricidade. (Vinayagamoorthi, 2024).

Segundo El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022), a primeira geração de painéis solares de silício cristalino (C-Si) domina o mercado global desde a década de 1990, quando a tecnologia solar começou a se desenvolver e até 2019 ainda representavam 95% da produção global de painéis solares, sendo, por isso, foco da pesquisa dos autores e deste estudo.

Figura 1 - Composição de uma célula de silício cristalino



Fonte: Vinayagamoorthi et al., (2024, p. 2)

A segunda geração de painéis fotovoltaicos usa células solares de película fina, mais econômicas em comparação com aquelas da primeira geração. Exemplos comuns de células solares fotovoltaicas de segunda geração são telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e células solares de silício amorfo hidrogenado. Ainda nesta geração usa-se vidro como substrato.

A terceira geração seria a atual, ainda iniciante. A maioria dos tipos de células solares de terceira geração reconhecidos é composta por células tandem (micromorfo, arsenieto de gálio), perovskita e células solares sensibilizadas por corantes.

El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) argumentam que, em consonância com o princípio da economia circular de manter produtos e materiais na cadeia de valor com a mais alta qualidade pelo maior tempo possível, a reciclagem deve ser considerada a última opção. A reciclagem é cara, exige muito consumo de energia e, acima de tudo,

resulta em diminuição da qualidade, aumento da impureza dos materiais ou até mesmo sua perda. Ainda assim, os painéis solares reutilizados inevitavelmente enfrentarão seu fim de vida útil e a necessidade de reciclagem após algum tempo de reutilização.

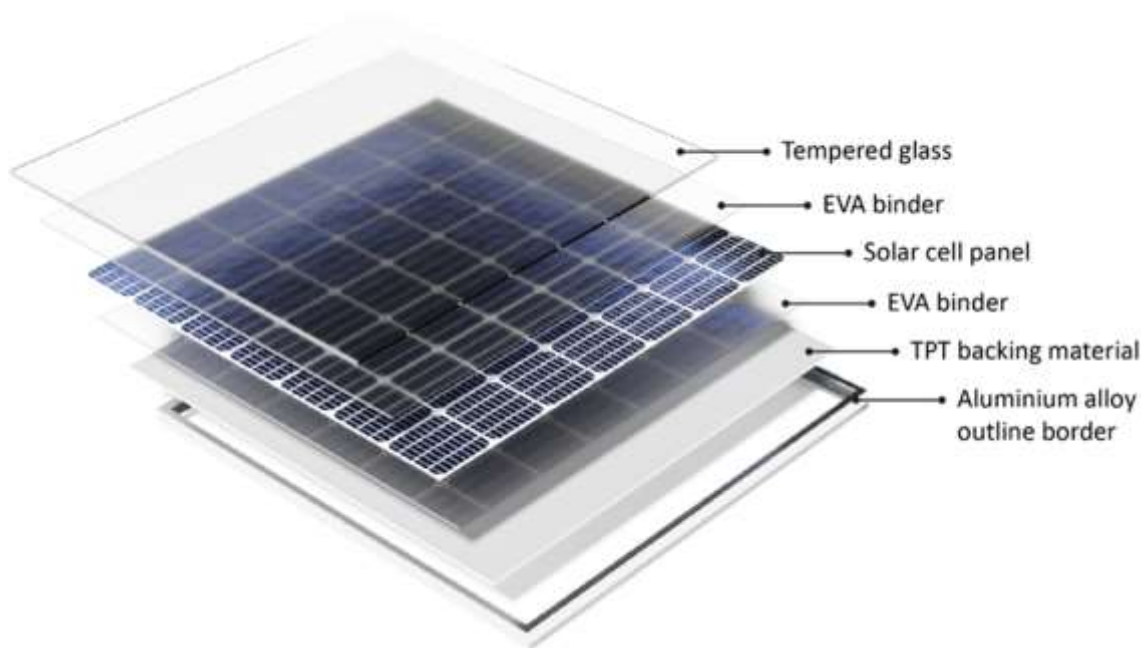
O aumento acelerado no uso da tecnologia fotovoltaica implicará, inevitavelmente, em um crescimento proporcional do volume de resíduos ao término do ciclo de vida útil das usinas (IRENA; IEA-PVPS, 2016; Al Zaabi; Ghosh, 2024). Embora relatórios internacionais apontem para metas sustentáveis, a prática corrente em diversos países ainda se apoia no descarte em aterros sem tratamento prévio, postergando a resolução de graves passivos ambientais (Vinayagamoorthi et al., 2024; Rahman; Chowdhury, 2023). A reciclagem de módulos fotovoltaicos traria benefícios econômicos e ambientais consideráveis com a implementação de políticas adequadas. Dadas as metas ambiciosas de aumento de capacidade, é essencial garantir que a tecnologia e a indústria fotovoltaica sejam sustentáveis (Vinayagamoorthi et al., 2024). Na realidade de campo, a vida útil de cerca de 25 a 30 anos estimada pelos fabricantes é frequentemente interrompida de forma prematura por avarias físicas (Al Zaabi; Ghosh, 2024; Pedroso; Santos; Pires, 2023). Dentre as principais falhas de natureza mecânica e térmica que comprometem a integridade dos módulos (cuja composição típica em camadas é ilustrada na Figura 2), as pesquisas destacam os danos físicos decorrentes da quebra de vidro temperado, defeitos de laminação e, fundamentalmente, a degradação e descoloração do polímero etileno-acetato-de-vinila (EVA) decorrente da exposição contínua à radiação ultravioleta e a variações extremas de temperatura (Vinayagamoorthi et al., 2024; Venkatachary et al., 2020).

Essa degradação física expõe a complexa composição material dos módulos, revelando tanto riscos de toxicidade ambiental quanto oportunidades de mineração urbana (Sharma et al., 2021). Por um lado, os painéis abrigam componentes perigosos como o chumbo e o estanho, que demandam manejo controlado para evitar a contaminação de solos e águas subterrâneas por lixiviação em aterros comuns (Sharma et al., 2021; XU et al., 2018). Por outro lado, contêm semicondutores e metais nobres de elevado valor agregado como cobre e, principalmente, o silício (Si) e a prata (EL-KHAWAD; BARTKOWIAK; KÜMMERER, 2022; Vinayagamoorthi et al., 2024). Conforme detalhado na Figura 1, a arquitetura interna da célula de silício cristalino apoia-se no uso de uma pasta de prata para a condução elétrica. Esse insumo representa a segunda substância mais dispendiosa na composição física do módulo, gerando uma forte pressão

sobre os recursos minerais: dados setoriais demonstram que o mercado fotovoltaico consome anualmente cerca de 10% da produção global de prata, gerando alertas severos na literatura sobre o risco iminente de exaustão dessas reservas globais caso a capacidade produtiva escale para a escala de *terawatts* sem a devida consolidação de circuitos fechados de recuperação (Vinayagamoorthi et al., 2024; Chowdhury et al., 2020).

Contudo, a viabilização de rotas industriais capazes de reabsorver esses metais valiosos esbarra em entraves operacionais e políticos. Atualmente, a maior parte do refugo fotovoltaico global ainda é destinada de forma linear, evidenciando que mesmo em regiões pioneiras como a União Europeia — sob a égide da diretiva WEEE —, as estruturas de reciclagem comercial ainda operam em um nível básico (Chowdhury et al., 2020; El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Esse modelo primário baseia-se em processos puramente mecânicos de trituração e moagem, que logram recuperar de maneira economicamente viável apenas as frações mais volumosas e pesadas do painel, quais sejam a estrutura externa de alumínio e o vidro temperado de cobertura (Ngagoum Ndalloka et al., 2024; Sharma et al., 2021). Embora esses elementos representem mais de 80% do peso total do módulo, eles possuem baixo valor unitário de revenda, enquanto os metais de alta pureza (como a prata e o silício das células) acabam misturados ou perdidos nos rejeitos finais, o que reforça a urgência no aprimoramento de tecnologias avançadas de purificação (Vinayagamoorthi et al., 2024; El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022)

Figura 2 - Estrutura típica de um painel fotovoltaico C-Si



Fonte: Vinayagamoorthi et al, 2024, p. 2

Existem alguns processos para recuperação de vários componentes dos painéis em fim de vida útil, dentre eles: esmagamento, uso de solventes orgânicos e processos hidrometalúrgicos.

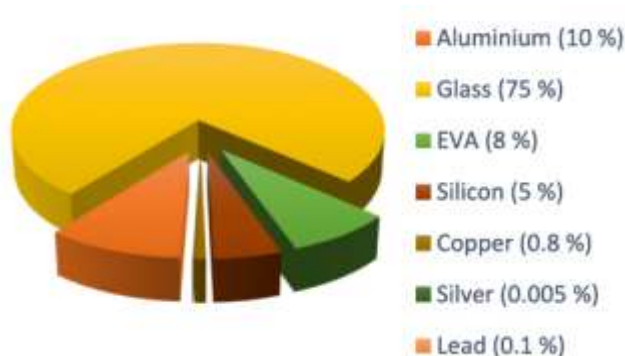
El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) mostram que no passado a reciclagem de painéis solares envolvia apenas a recuperação de alumínio e vidro, visto que estes são os materiais menos complicados de se recuperar de um painel solar desativado. No entanto, processos de reciclagem foram desenvolvidos e atualmente são capazes de recuperar mais do que apenas vidro e alumínio. A maioria dos processos de reciclagem é composta por combinações de operações mecânicas, térmicas e químicas, com o objetivo de separar a camada de etil vinil acetato (EVA) do vidro e da célula, bem como recuperar o silício e metais como alumínio, prata, chumbo e cobre. Assim, a maioria dos processos de reciclagem de painéis solares começa com a desconstrução manual do painel solar, durante a qual a estrutura de alumínio, a caixa de junção e os cabos de cobre são removidos. Em seguida, ocorre a remoção ou separação do encapsulante de EVA que envolve a célula de silício e a recuperação do silício e dos metais

Os materiais valiosos encontrados nos painéis solares e passíveis de recuperação são: cobre, prata, wafers de Silício, vidro e alumínio.

El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) afirmam que além das dificuldades técnicas, atualmente a falta de viabilidade econômica dos processos de reciclagem parece ser um dos obstáculos mais significativos. Assim, afirmam que os custos da reciclagem são sempre maiores do que o lucro da revenda do material recuperado, mas no futuro, quando as reservas de recursos diminuïrem enquanto a demanda por recursos continuar aumentando, os preços das matérias-primas virgens serão mais altos; portanto, o valor dos materiais reciclados aumentará, podendo reverter a inviabilidade atual.

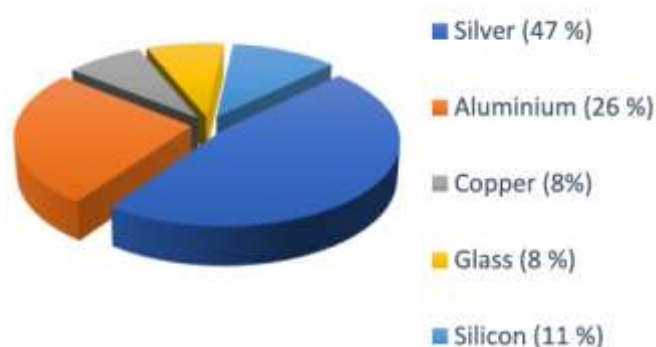
Um dos principais desafios para a implementação da reciclagem de painéis solares é que ela só se torna viável se os materiais recuperados forem valiosos o suficiente para financiar o próprio processo (El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer, 2022). As matérias-primas recicladas precisam ser mais baratas do que as matérias-primas primárias. Atualmente, os materiais que mais contribuem para o peso do painel não correspondem à sua contribuição para o valor total do painel solar, conforme as Figuras 3 e 4:

Figura 3 - Distribuição de material em painéis solares c-Si de acordo com o peso



Fonte: El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer, (2022, p. 4).

Figura 4 - Distribuição de materiais em painéis solares c-Si de acordo com o valor econômico



Fonte: El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer, (2022, p. 5).

Como pode ser constatado pelas Figuras 3 e 4, evidencia-se um gargalo prático na literatura: a assimetria entre a viabilidade técnica e a econômica da reciclagem. Materiais de alto valor agregado (como prata, cobre e silício) estão presentes em frações mínimas e exigem processos complexos de extração. Em contrapartida, os materiais que mais contribuem para o peso do painel (como o vidro e o alumínio) possuem historicamente um menor valor de mercado (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Somando-se a isso, dinâmicas macroeconômicas globais e o ganho de escala na fabricação de células solares provocaram uma redução drástica e contínua no custo do silício purificado ao longo das últimas décadas (Irena; IEA-PVPS, 2016; Al Zaabi; Ghosh, 2024). Esse fenômeno de mercado, impulsionado pela maturidade tecnológica e pelo alto volume de estoques na cadeia de distribuição global, reflete-se diretamente na queda acentuada dos preços dos módulos praticados no mercado nacional (Greener, 2024). Como consequência direta dessa expressiva desvalorização do silício metálico, relatórios e divulgações do setor indicam uma inversão na representatividade de custos do painel: componentes estruturais antes considerados secundários, como as molduras de alumínio, o vidro de cobertura e as pastas de prata para contatos, passaram a representar frações mais onerosas do custo físico de montagem do que o próprio elemento semicondutor (Divya et al., 2023; Bianchin, 2025).

Apesar dessa complexidade econômica na extração, a destinação inadequada desses equipamentos é insustentável. Atualmente, a maior parte do lixo fotovoltaico ainda é descartada em aterros sanitários, gerando uma preocupação ambiental alarmante. Esse alerta não se deve apenas ao grande volume projetado para as próximas décadas, mas à

presença de materiais tóxicos que vão para os aterros, como o estanho (Sn) e o chumbo (Pb), além de materiais de alto valor como prata, cobre e silício que poderiam ser recuperados e reaproveitados (Vinayagamoorthi et al., 2024). Além de mitigar essa toxicidade, a reciclagem apresenta uma enorme vantagem ambiental ao recuperar o silício, o que economiza energia na fabricação de novas placas e reduz significativamente a emissão de CO₂ ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento (Vinayagamoorthi et al., 2024).

Diante dessa barreira econômica e da urgência ambiental, a literatura de gestão aponta que o avanço da reciclagem dependerá fortemente de regulamentações estruturadas. A União Europeia desponta como pioneira nesse cenário, amparada pela diretiva WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), que atribui ao produtor a responsabilidade financeira pela coleta e reciclagem de todo o lixo fotovoltaico gerado (Vinayagamoorthi et al., 2024). Contudo, observa-se criticamente que políticas pautadas exclusivamente em metas de peso — como é o caso europeu — tendem a incentivar apenas a recuperação dos itens mais pesados e fáceis (vidro e alumínio), negligenciando a extração dos materiais críticos de alto valor, que acabam perdidos nos fluxos de resíduos mistos, levantando a dúvida se o problema está sendo resolvido em um sistema de circuito fechado real ou se o passivo destes resíduos está apenas sendo transferido para o futuro, incluindo o fato de que em algum momento, os materiais dos painéis não poderão mais ser recuperados nas altas qualidades necessárias devido às limitações intrínsecas da reciclagem, levando à geração de resíduos mesmo assim. (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Isso evidencia a necessidade de modelos alternativos que otimizem os custos e valorizem os componentes em nível regional.

As possíveis abordagens para recuperação de módulos e reciclagem são: reciclagem mecânica, térmica e química.

Foram estudadas políticas elaboradas para a gestão de painéis fotovoltaicos em fim de vida (EOL) em todo o mundo, com concentração nos principais mercados de energia solar: Alemanha, Índia, China e EUA.

A Alemanha deve gerar, até 2030, entre 400mil e 1 milhão de toneladas de perdas em módulos fotovoltaicos. Em resposta, eles criaram um registro nacional de resíduos de equipamentos elétricos que registra os produtores de lixo eletrônico. A Alemanha também tornou os produtores de painéis fotovoltaicos responsáveis pela coleta, triagem, desmontagem, reciclagem ou descarte de lixo eletrônico. (Vinayagamoorthi, 2024).

Até 2030, os EUA devem gerar entre 170 mil e 1 milhão de toneladas de resíduo fotovoltaico, mas até 2050 esse número deve crescer 7 vezes e chegar a 7,5 milhões de toneladas. (Vinayagamoorathi, 2024).

Na China, em 2050, deve-se chegar a 19 milhões de toneladas de resíduo fotovoltaico. A Índia também apresenta crescimento exponencial chegando a 7,5 milhões de toneladas em 2050. A viabilidade da reciclagem de painéis em fim de vida é ditada pelas políticas de governo, transferindo incentivos entre as diversas partes interessadas na cadeia de valor.

Avançando na discussão sobre as barreiras econômicas, a literatura apresenta pontos de convergência e divergência quanto às estratégias de gestão para o fim de vida útil dos equipamentos. Autores como D'Adamo et al. (2023) convergem com a visão da inviabilidade econômica atual, demonstrando que a lucratividade das usinas de reciclagem é altamente incerta, dependendo fortemente da flutuação dos preços dos materiais recuperados e de incentivos governamentais. Em contrapartida, pesquisadores como Al Zaabi e Ghosh (2024) e Tsanakas et al. (2020) divergem do foco exclusivo na reciclagem destrutiva de materiais. Esses autores argumentam que, do ponto de vista da gestão, o reuso e o reparo (remanufatura) dos módulos para mercados secundários são opções frequentemente mais viáveis e custo-efetivas no curto prazo. A reutilização gera a maior receita financeira com o mínimo de processamento industrial, embora esbarre atualmente em lacunas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), especialmente na falta de testes oficiais e certificação que garantam a confiabilidade técnica desses painéis de segunda mão para os consumidores.

Para superar essa falta de confiabilidade, rastreabilidade e a complexidade na divisão dos custos da logística reversa, a literatura recente tem explorado a integração de novas tecnologias na gestão da cadeia de suprimentos. A adoção de plataformas informacionais ágeis e ferramentas da Indústria 4.0 surge como uma fronteira de inovação necessária. Morshed Chowdhury et al. (2024), por exemplo, introduzem o uso da tecnologia blockchain para viabilizar uma economia circular colaborativa no setor solar. Essa inovação tecnológica na gestão permite rastrear a localização, a quantidade e o fim de vida útil de cada painel após a saída da fábrica. Através de contratos inteligentes (*smart contracts*), a tecnologia distribui as responsabilidades financeiras da reciclagem de forma transparente e automatizada entre fabricantes, usuários e empresas de reciclagem. Essa digitalização preenche uma lacuna crítica, conectando atores do ecossistema que

tradicionalmente não interagem e garantindo que o custo da reciclagem seja diluído e rastreado ao longo de toda a vida útil do produto, descentralizando a gestão do passivo ambiental.

Indo além, a literatura aponta que a transição para um sistema de circuito fechado real dependerá de inovações tecnológicas no design dos módulos, da escassez futura de matérias-primas virgens, que elevará o preço dos reciclados e, fundamentalmente, de novos modelos logísticos e de negócios (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). É exatamente nessa lacuna da estruturação logística e da redução de custos operacionais que se insere a necessidade de discutir abordagens alternativas, como a regionalização das cadeias.

Para que a destinação final dessa complexa estrutura de materiais se operacionalize de maneira sustentável e integrada, a literatura científica se divide em duas grandes vertentes de análise. A primeira, de caráter técnico e de engenharia de materiais, investiga as rotas de processamento químico, físico e térmico para a separação e recuperação dos componentes com alto grau de pureza. A segunda, sob a perspectiva de gestão, avalia a viabilidade financeira, os modelos de negócios, as políticas públicas e os arranjos logísticos necessários para viabilizar a reciclagem na prática de mercado. Compreender o estado da arte dessas duas dimensões é um passo fundamental para fundamentar a proposição de circuitos fechados regionais, conforme detalhado nas subseções a seguir.

2.1.1. Literatura técnica sobre reciclagem de placas fotovoltaicas

Utilizando-se os termos *solar panel recycling* como critério de busca no Google Acadêmico separaram-se os artigos técnicos daqueles de gestão e elaborou-se o Quadro 1 a seguir com a lista de artigos técnicos utilizados como referência sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos.

Artigo	Revista	ano	Autor	tipo de artigo (técnico ou gestão)	Número de citações
Recycling of crystalline silicon photovoltaic solar panel waste to modified composite products	Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology	2021	S Ram Kokul	Técnico	14
A methodology to liberate critical metals in waste solar panel	Applied Energy	2023	Mingkai Li	Técnico	18
Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules	Journal of Cleaner Production	2022	Mitchell Shyan Wei Lim	Técnico	75
Towards sustainability via recycling solar photovoltaic Panels, A review	Solar Energy	2025	Yasmin R. Maghraby	Técnico	11
Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling	Waste Management	2019	Sanna-Mari Nevala	Técnico	127
Boost-Up Efficiency of Defective Solar Panel Detection With Pre-Trained Attention Recycling	IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS	2023	YeongHyeon Park	Técnico	10
State of the art of end-of-life silicon-based solar panels recycling with a bibliometric perspective	Solar Energy Materials and Solar Cells	2025	Javier Ramírez- Cantero	Técnico	3
Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste	Science of the Total Environment	2021	Hari Bhakta Sharmaa	Técnico	69
Particle-scale modelling of the pyrolysis of end-of-life solar panel particles in fluidized bed reactors	Resources, Conservation & Recycling	2022	Shuai Wang	Técnico	38
A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology	Solar Energy Materials and Solar Cells	2022	Xiaopu Wang	Técnico	165

Quadro 1 - Lista de artigos técnicos sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos

Fonte: Elaborado pelo autor

Os artigos técnicos apresentam revisões sobre as metodologias existentes, propõem novos modelos para reciclagem ou analisam seus impactos no meio ambiente. Não houve menções ao uso de tecnologias digitais.

Wang et al. (2022) apresentam uma síntese abrangente das soluções atuais para reciclagem, apontando prós e contras de cada uma e demonstrando a importância da reciclagem para melhorar o retorno econômico e reduzir o impacto ambiental, já que os painéis contêm materiais valiosos e, ao mesmo tempo, elementos potencialmente tóxicos.

Em um contexto mais geral, Maghraby et al. (2025), apresentam os componentes dos painéis solares, bem como as formas de reciclagem, além das políticas e regulamentações de reciclagem, enquanto Ramírez-Cantero et al. (2025) elaboraram uma revisão bibliográfica sobre os processos de reciclagem para painéis fotovoltaicos visando aproveitamento de vidros, metais e plásticos.

Várias propostas de formas de reciclagem são sugeridas. Lim et al. (2022), por exemplo, apresentam um método eficiente de se aproveitar/recuperar os componentes dos painéis com bom aproveitamento e *payback* inferior a 1 ano, usando delaminação do módulo, ataque ácido e eletrodeposição sequencial. Enquanto Wang e Shen (2022), apresentam um método de reciclagem usando pirólise e seus resultados iniciais de acordo com a variação de temperatura.

Ainda no contexto de reciclagem, Li et al. (2023) apresentam uma metodologia combinada de trituração e moagem para delaminar os painéis e aproveitar os metais críticos que os compõem, enquanto Kokul e Bhowmik (2021) apresentam os resultados do processo de compressão das placas após separação manual do vidro. Os autores misturaram placas ao polipropileno e demonstraram os resultados.

Como contraponto a essas metodologias, Nevala et al. (2019) apontam que ainda não há solução universal de economia circular consolidada para o lixo fotovoltaico e apresentam uma alternativa para tentar recuperar e aproveitar os principais componentes dos painéis por meio de esmagamento e fragmentação eletro-hidráulica (EHF). Somando-se à preocupação com a reciclagem, Sharma et al. (2021) apresentam os efeitos prejudiciais dos componentes das placas no processo de lixiviação e a importância da antecipação de uma destinação adequada do lixo fotovoltaico antes do fim de sua vida útil. Por fim, Park et al. (2023) abordam um modelo para detecção de defeitos em painéis solares.

Em síntese, ao promover um diálogo entre as obras técnicas apresentadas no Quadro 1, é possível identificar fortes convergências quanto à urgência do problema, mas divergências quanto às melhores rotas de processamento. Autores como Wang et al. (2022), Maghraby et al. (2025) e Sharma et al. (2021) convergem ao destacar o duplo desafio imposto pelos resíduos fotovoltaicos: eles representam simultaneamente uma fonte de contaminação ambiental severa (devido à lixiviação de componentes tóxicos nos aterros) e uma oportunidade de mineração urbana de materiais de alto valor agregado.

Contudo, as soluções propostas para a separação (delaminação) e extração desses materiais divergem em suas abordagens e na relação de custo-benefício. Por um lado, pesquisas focadas em rotas químicas, térmicas e eletroquímicas, como as de Lim et al. (2022) e Wang e Shen (2022), apresentam alta eficiência e pureza na recuperação de metais críticos e silício. O contraponto evidenciado na literatura é que tais processos frequentemente demandam alto consumo de energia e a utilização de reagentes ácidos e solventes, gerando preocupações sobre impactos secundários e custos de implantação.

Divergindo dessas rotas complexas, outros autores defendem o uso de forças físicas e mecânicas. Trabalhos como os de Nevala et al. (2019), Li et al. (2023) e Kokul e Bhowmik (2021) exploram a fragmentação eletro-hidráulica, processos de moagem ou a incorporação direta dos resíduos triturados em compósitos poliméricos. Embora essas alternativas mecânicas reduzam o consumo de energia e evitem o uso de químicos agressivos, elas enfrentam o desafio de separar e purificar os metais nobres com a mesma eficácia, resultando muitas vezes em uma solução paliativa de baixo valor agregado (downcycling).

Essa multiplicidade de métodos experimentais corrobora o alerta de que ainda não existe um processo técnico de reciclagem padronizado e universalmente validado como a melhor tecnologia disponível para fechar o ciclo da economia circular (Ramírez-Cantero et al., 2025). Depreende-se, portanto, que enquanto a literatura técnica concentra seus esforços em otimizar as tecnologias de separação e pureza em laboratório, ela deixa uma lacuna de pesquisa em relação à viabilidade logística e aos modelos de negócios necessários para trazer os painéis do campo até essas instalações (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Essa limitação inerente aos estudos restritos à engenharia de materiais torna imperativa a integração com a literatura de gestão e de cadeias de suprimentos (Xu et al., 2018).

2.1.2. Literatura sobre reciclagem de placas fotovoltaicas na perspectiva de gestão

Usando-se como busca os termos *solar panel recycling* no Google Acadêmico separaram-se os artigos técnicos daqueles de gestão e elaborou-se o Quadro 2 a seguir com a lista de artigos de gestão utilizados como referência sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos.

Artigo	Revista	Ano	Autor	Tipo de artigo (técnico ou gestão)	Número de citações	Menciona tecnologias digitais
A Blockchain-Enabled Circular Economy	IEEE xplore	2024	Mohammad Javed Morshed Chowdhury ,	Gestão	2	sim
Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling	Waste Management & Research	2019	Çağdaş Gönen	Gestão	52	
Solar photovoltaic recycling strategies	Solar Energy	2024	Zita Ngagoum Ndalloka	Gestão	47	
Recycling of solar PV panels in Bangladesh along with South and South East Asia	ScienceDirect	2023	Md Mostafizur Rahman	Gestão	8	
Policy design of government subsidy for end-of-life solar panel recycling	Applied Mathematical Modelling	2024	Tiantong Xu	Gestão	8	
Global status of recycling waste solar panels: A review	Waste Management	2018	Yan Xu	Gestão	641	
An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling	Energy Strategy Reviews	2020	Md. Shahariar Chowdhury	técnico e gestão	768	
Review on recycling of solar modules/panels	Solar Energy Materials and Solar Cells	2023	A. Divya	técnico e gestão	89	
Solar Panel Recycling from Circular Economy Viewpoint: A Review	ECONOMICS AND ECOLOGY OF SOLAR ENGINEERING	2024	K Sivagami	técnico e gestão	4	
Economics and impact of recycling solar waste materials on the environment and health care	Environmental Technology & Innovation	2020	Sampath Kumar Venkatachary	técnico e gestão	55	
Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation	Journal of Environmental Chemical Engineering	2024	Vinayagamoorthi	técnico e gestão	24	
Improving the end-of-life management of solar panels in Germany	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2022	Livia El-Khawad, Dorota Bartkowiak, Klaus Kümmerer	Gestão	43	não

Quadro 2 - Lista de artigos de gestão sobre reciclagem de painéis fotovoltaicos

Fonte: Elaborado pelo autor

Os artigos de gestão voltados aos resíduos de painéis fotovoltaicos estão em crescimento e mostram que, apesar de ainda não haver consenso global sobre os melhores modelos operacionais e regulatórios, a urgência ambiental e econômica em torno da destinação correta é real e atual (Chowdhury et al., 2020; Al Zaabi; Ghosh, 2024). Inserido nesse contexto de crescente preocupação, Divya et al. (2023) conduziram um artigo de revisão que busca alertar para a importância da reciclagem de painéis fotovoltaicos. Quando não há viabilidade para o reuso ou redução, os autores apontam que a reciclagem é a única opção sustentável, destacando que o processo já começa a ganhar viabilidade comercial.

Enquanto isso, Chowdhury et al. (2020) fizeram um estudo apontando o pioneirismo da UE no trato com resíduos de painéis solares, mas o estudo aponta que ainda há caminho a ser percorrido nesta área, e que o conhecimento da gestão na Europa pode ser um caminho para os países ainda incipientes neste tema. Contribuindo na temática, Sivagami et al. (2024) exploram os métodos de reciclagem: físicos, térmicos e químicos e aponta a Europa como pioneira em políticas de gerenciamento de resíduos solares. É mostrado um modelo de economia circular com remoção de componentes das placas e reintegração no processo de fabricação.

A preocupação com o tema não fica apenas na Europa. Rahman e Chowdhury (2023) pesquisaram o processo de reciclagem em Bagladesh e países do sul da Ásia e apontaram a necessidade de um processo de economia circular para a reciclagem propondo inclusive um modelo. Vinayagamoorthi et al. (2024) comparam formas de reciclagem dos painéis e apresentam as políticas de reciclagem adotadas em diferentes países. No mesmo sentido, Ndalloka et al. (2024) apresentam e analisam políticas de reciclagem de painéis no mundo, revisando as estratégias de reciclagem para os diversos tipos de painéis, descrevendo as etapas da cadeia de reciclagem e fazendo uma análise econômica e ambiental dos elementos reciclados, recomendando uma política de reciclagem para os painéis

Complementando, El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) avaliam barreiras e soluções para criação de circuito fechado na indústria fotovoltaica de silício cristalino na Alemanha, sugerindo questões regulatórias, tecnológicas, econômicas e de negócios. Do ponto de vista regulatório acreditam que as metas de reciclagem não deveriam estar vinculadas apenas ao peso, para incentivar a recuperação de todos os materiais. Ajustes no design dos projetos dos painéis podem garantir que o reparo, a reforma e a reciclagem

sejam possíveis. O produto como serviço também é recomendado, pois incentivaria a produção de painéis que pudessem ser facilmente reparados e posteriormente reciclados.

Xu, Liu e Mo (2024) investigaram um modelo de reciclagem solar subsidiado pelo governo baseado em jogos e estendendo o modelo para um sistema dinâmico. Os subsídios visam desenvolver a pesquisa e o desenvolvimento em reciclagem. Por sua vez, Venkatachary et al. (2020) mostraram preocupação com o lixo fotovoltaico, apontando a reciclagem como solução. Dessa forma, apresentam as opções de reciclagem, bem como seus impactos econômicos e ambientais na busca de uma solução não tóxica. Da mesma forma, Gönen e Kaplanoğlu (2019), apontam preocupação com o lixo fotovoltaico e valorizam o potencial financeiro que a reciclagem pode trazer, avaliando a recuperação de seus resíduos. Além disso, seu artigo também aponta para a produção de painéis ainda não tão "verdes".

No campo das tecnologias digitais, M. J. M. Chowdhury et al. (2024), trataram da reciclagem no âmbito da economia circular usando a tecnologia blockchain para rastrear os painéis no EOL e atribuem responsabilidades dividindo os custos entre todos os elos da cadeia. Assim como Xu et al. (2018), apresentam o estado atual das tecnologias de reciclagem para painéis e fornecem dados quantitativos para justificar políticas públicas na área.

Em síntese, o diálogo entre as pesquisas de gestão apresentadas no Quadro 2 revela uma forte convergência central: a transição para a economia circular no setor fotovoltaico não ocorrerá de forma orgânica apenas pelas forças do livre mercado, devido à atual barreira da inviabilidade econômica. Autores como Gönen e Kaplanoğlu (2019) e Venkatachary et al. (2020) concordam com o enorme potencial financeiro e ambiental a longo prazo. No entanto, assim como Ndalloka et al. (2024) e Rahman e Chowdhury (2023), eles enfatizam que o destravamento dessa indústria depende intrinsecamente de forte formulação de políticas e intervenção governamental.

Contudo, a literatura apresenta divergências sobre qual seria o modelo regulatório e financeiro mais eficiente para custear essa logística reversa. Por um lado, o modelo europeu (diretiva WEEE), apontado como pioneiro por Sivagami et al. (2024) e M. S. Chowdhury et al. (2020), aposta na Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR) baseada em cotas de coleta. Essa abordagem é duramente criticada por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022), que argumentam que regulamentações baseadas estritamente no "peso" dos resíduos levam a um mercado viciado, no qual as empresas

reciclam apenas vidro e alumínio para bater as metas legais, permitindo que os metais nobres e críticos se percam. Como um contraponto a esse modelo de obrigatoriedade, pesquisadores como Xu, Liu e Mo (2024) divergem da estratégia punitiva e propõem modelos baseados na injeção de subsídios governamentais diretos para viabilizar e incentivar a pesquisa em reciclagem, dividindo o peso financeiro da operação.

Para conciliar esse embate entre custos e leis, emergem propostas inovadoras que integram gestão e tecnologia. M. J. M. Chowdhury et al. (2024), por exemplo, elevam o debate ao propor que, em vez de sobrecarregar apenas o fabricante ou depender de subsídios, a cadeia deve adotar a tecnologia *blockchain* e *smart contracts* para rastrear o painel e ratear o custo da reciclagem entre todos os usuários ao longo da vida útil do equipamento. Outros defendem a mudança radical para modelos de "produto como serviço" (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022).

Diante desse debate, depreende-se, no entanto, que embora a literatura de gestão discuta o arcabouço macroeconômico, as leis e o rastreamento digital, ela negligencia o desafio espacial e operacional em nível micro: o elevado custo do frete para transportar volumes pulverizados de painéis do consumidor final até as (ainda raras) plantas de reciclagem por meio da logística reversa tradicional (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024). É exatamente essa lacuna logística — de como aproximar o resíduo pulverizado da solução de processamento — que torna imperativa a exploração do conceito de Cadeias Curtas de Suprimentos na gestão fotovoltaica, buscando mitigar os custos de transporte e fomentar o reaproveitamento em nível regional (Kiss; Ruskai; Takács-György, 2019).

2.2. Economia Circular, Cadeias Curtas de Suprimentos e Desenvolvimento de Produtos Circulares

Como evidenciado na seção anterior, o principal entrave para a viabilidade da reciclagem fotovoltaica não reside apenas nas limitações químicas ou tecnológicas, mas sim na barreira logística gerada pelas longas distâncias entre a geração do resíduo e as plantas de processamento. Para superar a inviabilidade desse modelo linear tradicional, repensar a estruturação da cadeia sob a ótica da Economia Circular torna-se uma alternativa valiosa. É exatamente neste cenário de transição, que busca modelos

descentralizados e autossustentáveis, que o conceito de Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) emerge como uma solução teórica promissora.

2.2.1. Economia Circular e Desenvolvimento de Produtos Circulares

Pilla Jr, Pimenta e De Oliveira (2024) afirmam que a adoção da economia circular pode ainda proteger o fluxo de recursos de flutuações de preço, sazonalidade e quebras na cadeia de abastecimento. Nota-se assim que a logística reversa demanda a colaboração de toda a cadeia para reestruturar o fluxo de materiais e informação para promover a circularidade.

Assim, conforme os autores, a estratégia da cadeia de suprimentos tem como objetivo a eficiência através de abordagens como redução de custos, minimização de resíduos e otimização de recursos.

Nos últimos anos, a sustentabilidade também se tornou uma peça-chave nas pesquisas de cadeia de suprimentos, criando a preocupação com sistemas sustentáveis, diversificação da produção e contribuindo para o desenvolvimento das economias regionais. (De Fazio, 2016).

A Cadeia curta é caracterizada por um menor número de operadores econômicos dedicados a uma colaboração mútua, desenvolvimento da economia local e uma relação comercial e social mais próxima entre produtores e consumidores. (Jarzębowski et al., 2020; Kiss et al., 2019; Pató e Kiss, 2020). Ou seja, a cadeia curta trata da redução de distâncias entre produção e consumo.

A adoção das cadeias curtas traz vários benefícios, como a redução de resíduos, mitigação de poluição, menor impacto ambiental, desenvolvimento da economia local, possibilidade de comércio em menor escala, eficiência logística e impacto social. (Jarzębowski et al., 2020; Raftowicz et al., 2020; Ruskai et al., 2021).

A adoção da cadeia curta pode não ser viável para todos os produtos ou atividades, entretanto apesar dela poder surgir com baixo investimento, acesso limitado a tecnologia e equipamentos leva à necessidade de financiamento para desenvolvimento de inovação, sendo a falta de competências adequadas um desafio. (Jarzębowski et al., 2020).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos traça as diretrizes de sustentabilidade indicando a responsabilidade compartilhada entre o ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, Pilla Jr, Pimenta e De Oliveira (2024).

Algumas ideias poderiam assim ajudar a desenvolver o progresso da gestão dos resíduos fotovoltaicos, como incentivos fiscais, pesquisa e desenvolvimento, gestão de processos. A logística reversa tem um papel essencial para reintegração dos resíduos em um novo ciclo econômico com o objetivo de evitar o descarte inadequado, maximizando a reciclagem e reduzindo o descarte em aterros sanitários. (Cosenza et al., 2020).

A aplicação dos conceitos de cadeia curta pode ser estendida a logística reversa, reciclagem e produção local. A colaboração entre os atores da cadeia fotovoltaica é essencial para a busca da forma correta de coleta, de boas práticas de reciclagem e desenvolvimento de um mercado para seus resíduos, permitindo assim alianças para cadeias mais rentáveis e sustentáveis, Pilla Jr, Pimenta e De Oliveira (2024).

O conceito da cadeia curta de suprimentos oferece vários benefícios, como a redução de gases de efeito estufa, devido à diminuição da necessidade de transporte, contribuindo para as metas de crescimento sustentável da ONU. A economia circular integrada neste processo possibilita o uso de materiais locais para reciclagem, levando a redução de requisitos de transporte e a menos impacto ambiental. (Zimon et al., 2020; Sanchez et al., 2020).

Conforme Pilla Jr, Pimenta e De Oliveira (2024), a economia circular é um conceito que busca integrar processos de produção e distribuição com o reuso, a reciclagem e a recuperação. Dessa forma, busca-se evitar que o crescimento econômico seja associado a um impacto ambiental negativo.

No caso das placas fotovoltaicas, a preocupação com seus resíduos cresce à medida que avançamos em sua vida útil e o crescimento de seu uso chega a níveis extraordinários, mostrando ser um caminho sem volta, conforme afirmam Vargas e Chesney (2021), bem como Zaabi e Ghosh (2024). Mais ainda quando pensamos que enquanto alguns de seus componentes são tóxicos e podem contaminar o ambiente, outros têm um grande valor de mercado, o que tem levado a várias pesquisas sobre reciclagem, embora ainda sejam incipientes os estudos sob a perspectiva da economia circular, Vargas e Chesney (2021).

Ainda segundo os mesmos autores, esta abordagem leva ao desenvolvimento de produtos mais duráveis. A circularidade leva à remodelagem dos sistemas de produção e consumo, trazendo a possibilidade de desenvolvimento de novos negócios e novas tecnologias. Pilla Jr, Pimenta e De Oliveira (2024) argumentam que desta forma faz-se necessária uma reavaliação do modelo linear de produção e consumo que termina por

sobrecarregar os aterros para um modelo circular que possa não só se preocupar com o ambiente, mas gerar empregos e trazer impacto social.

El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) argumentam que os painéis solares de silício cristalino são projetados com foco estrito na durabilidade física e na resistência a intempéries — tais como umidade, cargas mecânicas de vento, radiação solar e oscilações térmicas —, sem que haja um planejamento integrado voltado à sua destinação e tratamento ao término de seu ciclo de vida útil. Por exemplo, conexões entre diferentes partes que não podem ser facilmente separadas podem ser um problema para a desmontagem não destrutiva. Um painel de vidro constitui a primeira camada, seguido por um encapsulante de acetato de etil vinila. Em seguida, vêm a pastilha de silício que converte a luz solar em energia, outra camada de EVA, uma camada traseira para proteger toda a estrutura e uma estrutura de alumínio que mantém tudo unido (Figura 2). Esse projeto dificulta um reparo, remanufatura e reforma fáceis, uma vez que os componentes individuais não podem ser separados uns dos outros, exceto a estrutura de alumínio, que pode ser facilmente removida. Isso aumenta, assim, os esforços necessários para a reciclagem.

Os mesmos autores concluem que além destes pontos, módulos diferentes não podem ser conectados a um sistema solar, pois isso causa perdas por incompatibilidade e designs diferentes na extração dos componentes, o que levaria a problemas de logística e revenda.

Constata-se a necessidade de que princípios de Design for Disassembly (DfD) e de reciclabilidade — com foco na facilitação da desmontagem, na acessibilidade estrutural e na recuperação eficiente de constituintes de alto valor agregado — sejam integrados de maneira sistemática desde a etapa de concepção e projeto dos módulos fotovoltaicos de próxima geração (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022).

El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) comentam ainda que como os painéis solares reciclados ainda não são muito comuns no mercado, existe uma lacuna de conhecimento sobre a aceitação do consumidor, e pesquisas adicionais devem ser realizadas sobre esse comportamento. Sabe-se que os consumidores tendem a ser céticos em relação aos produtos reciclados em geral, assim; as empresas que utilizam painéis solares reciclados precisam estar cientes dessa barreira e encontrar uma maneira de superar esse desafio.

Os mesmos autores sugerem um registro central onde dados sejam coletados sobre os tipos de painéis em uso e quando se espera que atinjam o fim de sua vida útil ou fim

de uso. Na melhor das hipóteses, esse banco de dados também inclui informações sobre onde o tipo de painel está instalado. A infraestrutura de reciclagem de painéis fotovoltaicos precisa identificar esses obstáculos e deve se concentrar em minimizar a distância percorrida e maximizar a quantidade de módulos fotovoltaicos coletados, ou seja, localizando as instalações de reciclagem com base na quantidade de resíduos fotovoltaicos - fluxo de sucata de fabricação e componentes em fim de vida útil.

2.2.2. Literatura sobre cadeia curta

Utilizando-se o termo *short supply chain* como critério de busca no Google Acadêmico elaborou-se o quadro 3 a seguir com a lista de artigos sobre o tema.

Artigo	Revista	Ano	Autor	Área de foco	Número de citações	Menciona tecnologias digitais	Menciona reciclagem
The logistics of the short food supply chain: A literature review	Sustainable Production and Consumption	2021	Claudia Paciarotti, Francesco Torregiani	Alimento (Agricultura)	280	não	
Artificial Intelligence in Extended Agri-Food Supply Chain: A Short Review Based on Bibliometric Analysis	Conferencia Internacional sobre sistemas de informação e Engenharia Inteligentes e Baseados em Conhecimento	2021	José Monteiro	Alimento (Agricultura)	88	sim	sim
The short-term impact of US-China trade war on global GHG emissions from the perspective of supply chain reallocation	Environmental Impact Assessment Review	2023	Rong Yuan	Geral	28	não	não
Prioritizing requirements of Informational short food Supply Chain Platforms using a fuzzy approach	International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing	2021	Patrick R Burgess	Alimento (Agricultura)	29	sim	não
Evolution of Short Food Supply Chain Theory and Practice: Two-Sided Networks and Platforms	Energies	2022	Rita Lankauskienė, Dalia Vidickienė and Živilė Gedminaitė-Raudonė	Alimento (Agricultura)	17	não	não
Can new healthy luxury food products accelerate short food supply chain formation via social media marketing in high-income countries?	Agricultural and Food Economics	2022	Christoph F. Wiedenroth	Alimento (Agricultura)	14	sim	não
Application of FMEA analysis in the short cheese supply chain	meat technology	2020	Biljana Aleksić	Alimento (Agricultura)	9	não	não
Short supply chain of waste flows: designing local networks for landscape regeneration	Multidisciplinary Journal for waste Resources & Residues	2020	Marina Rigillo	construção e demolição	8	não	sim
Evolution of Short Food Supply Chain Innovation Niches and Its Anchoring to the Socio-Technical Regime: The Case of Direct	Sustainability	2021	Polita, F.S.; Madureira, L.	Alimento (Agricultura)	11	não	não

Artigo	Revista	Ano	Autor	Área de foco	Número de citações	Menciona tecnologias digitais	Menciona reciclagem
Selling through Collective Action in North-West Portugal							
Short Food Supply Chain: estado da arte na academia brasileira	Estudos Sociedade e Agricultura	2015	Sthefane Cristina de Lima Duarte	Agro-alimentar	25	não	não
Agriculture and sustainability of the welfare: the role of the short supply chain	Agriculture and Agricultural Science Procedia	2016	Manfredi De Fazio	agricultura	91	não	não
Short food supply chain: characteristics of a family farm	Ciência Rural	2018	Luane da Conceição Aguiar	agroalimentar	91	não	não
Opening the black box of food quality in the short supply chain: Effects of conventions of quality on consumer choice	Food Quality and Preference	2015	Giuseppina Migliore et al	agroalimentar	183	não	não
LCA for assessing environmental benefit of eco-design strategies and forest wood short supply chain: a furniture case study	Wood and other renewable resources	2014	Nadia Mirabella		86		
Short Supply Chain: Goals, Objectives and Attitudes of Producers	Acta Polytechnica Hungarica	2018	Anna Dunay, József Lehota, Éva Mácsai, Csaba Bálint Illés	agricultura	36	não	não
Using game theory for analysing pricing models in closed-loop supply chain from short- and longterm perspectives	International Journal of Production Research	2016	Maryam Esmaili, Ghazaleh Allameh & Taraneh Tajvidi	industrial	122	não	sim

Quadro 3 - Lista de artigos sobre short supply chain

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a evolução da literatura sobre Cadeias Curtas de Suprimentos (Quadro 3), observa-se que a base fundacional desta teoria está fortemente ancorada no setor agroalimentar, surgindo como uma resposta aos impactos socioambientais negativos gerados pelas cadeias longas e pela exclusão dos pequenos produtores (De Fazio, 2016). Autores convergem ao demonstrar que a aproximação entre produtor e consumidor estimula as economias locais e a transparência, possibilitando ao consumidor conhecer melhor a origem do produto, tendo como principais tópicos: localização, transparência e qualidade (Aguiar; Delgrossi; Thomé, 2018), benefícios que também foram validados no contexto acadêmico brasileiro (Duarte; Thomé, 2015). Para além do aspecto financeiro, pesquisas indicam que a adesão a essas cadeias é frequentemente motivada por objetivos não econômicos, como a preservação do estilo de vida das fazendas familiares, o uso de tecnologias ecologicamente corretas e da agricultura tradicional, construindo relacionamentos mais próximos com seus consumidores (Dunay et al., 2018), bem como pela capacidade de gerar inovação e renda por meio de grupos de ação coletiva para venda direta aos consumidores finais, caracterizando uma SFSC (Polita; Madureira, 2021).

Contudo, a literatura evidencia que a proximidade física, por si só, não garante o sucesso da cadeia. O fluxo de informações e a certificação de qualidade são gargalos críticos apontados por Migliore, Schifani e Cembalo (2015) para que o consumidor confie no modelo, auxiliando no suporte de estratégias que visem disseminar formas sustentáveis para distribuição e consumo de alimentos. Para superar esse desafio relacional, uma vertente mais recente de estudos foca nas tecnologias de comunicação. O desenvolvimento de plataformas informacionais com operações de troca de dados em tempo real (Burgess; Sunmola, 2021) e o uso do marketing via mídias sociais (Wiedenroth; Otter, 2022) têm se provado ferramentas indispensáveis para encurtar a distância entre a origem dos produtos e o consumidor final.

Apesar do forte apelo social e comunicacional, as cadeias curtas ainda esbarram no desafio da eficiência operacional. Paciarotti e Torregiani (2021) alertam que a transição para esse modelo exige uma profunda reestruturação logística que englobe a localização de infraestrutura, a roteirização e os tipos de veículos utilizados. Nesse sentido, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 desponta como solução: Monteiro e Barata (2021) destacam o uso da Inteligência Artificial para otimizar o armazenamento e reduzir desperdícios na pós-produção (distribuição e reciclagem) através de uma revisão bibliográfica, enquanto Aleksic et al. (2020), por meio da análise FMEA em produções artesanais, reforçam a necessidade de controles rigorosos contra falhas. Em um escopo macro, o aprimoramento dessas redes locais também desempenha um papel fundamental na mitigação de problemas globais, como a

redução na emissão de gases de efeito estufa no transporte devido a alteração nas relações comerciais entre EUA e China (Yuan et al., 2023).

Por fim, o aspecto mais relevante desta evolução literária é a expansão das Cadeias Curtas para além do setor de alimentos, impulsionada pelas mudanças da economia pós-industrial (Lankauskienė; Vidickienė; Gedminaitė-Raudonė, 2022). Mirabella, Castellani e Sala (2014) comprovaram a eficácia da cadeia curta ao aplicá-la na produção de móveis escolares, reduzindo significativamente os impactos de transporte de madeira de longa distância. No ambiente industrial, a gestão verde baseada na Cadeia de Suprimentos de Circuito Fechado (CLSC) combinada à remanufatura mostrou-se a estratégia mais lucrativa a longo prazo (Esmacili; Allameh; Tajvidi, 2016). Consolidando essa transição, Rigillo et al. (2020) expandem o conceito ao demonstrar que redes locais colaborativas são essenciais para a regeneração de fluxos de resíduos (como construção e demolição), abrindo um precedente valioso de que a aproximação territorial é uma premissa fundamental para inovar e viabilizar a gestão logística na reciclagem de materiais.

A partir do levantamento bibliográfico apresentado, percebe-se uma clara lacuna na literatura científica: a escassez de estudos empíricos que explorem as Cadeias Curtas de Suprimentos fora do contexto tradicional da agricultura e do setor de alimentos, bem como a falta de articulação sobre o uso de tecnologias digitais para a coordenação desses fluxos reversos (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024). Essa ausência de um arcabouço integrador limita a compreensão de como a proximidade geográfica e social pode ser estrategicamente estruturada para gerir resíduos tecnológicos de alto valor agregado e complexidade logística.

É exatamente nesse cenário de transição que a aplicação das CCS à reciclagem fotovoltaica torna-se não apenas oportuna, mas indispensável para lidar com as usinas que inevitavelmente atingirão o fim de sua vida útil por todas as regiões (Irena; IEA-PVPS, 2016). Essa abordagem ganha relevância diante da dispersão espacial dos módulos e da viabilidade de reaproveitamento local de seus componentes (El-Khawad; Bartkowiak; Kümmerer, 2022). Sob a perspectiva de gestão, essa discussão deve envolver não apenas o aproveitamento ao fim da vida útil, mas os próprios fabricantes no sentido de serem fabricados painéis que permitam a separação de seus componentes de maneira viável e usando tecnologias digitais para não só elaborar o processo, mas para de alguma forma medir e coordenar a reinserção segura das placas e seus componentes num ciclo social, econômico e sustentável na própria região geradora (Chowdhury et al., 2024; Vinayagamoorthi et al., 2024)..

2.2.3. Literatura sobre cadeia curta na perspectiva de reciclagem

Os estudos sobre a aplicação de cadeias curtas na reciclagem convergem quanto à necessidade de mitigar os altos custos logísticos das cadeias tradicionais, embora existam divergências sobre as barreiras e os custos de curto prazo para essa transição.

Por um lado, autores alertam para os desafios econômicos, informacionais e regulatórios iniciais. Xu e Yang (2022) apontam que a embalagem circular pode ser uma solução viável para a logística, mas exige regulamentação forte, penalidades, mecanismos de divulgação de informações e alto investimento em tecnologia. O estudo sugere uma divergência temporal de custos: haverá um aumento nos custos de pesquisa e desenvolvimento no curto prazo para colher reduções nos custos de embalagens apenas no longo prazo. Corroborando essa dificuldade operacional inicial, Slattery, Dunn e Kendall (2024) trazem preocupação quanto aos resíduos de baterias de carros elétricos. Além de apontar segurança, transporte e informação acessível sobre a composição da bateria e a capacidade restante como questões críticas, eles destacam que a falta de um sistema nacional de rastreamento e a dependência exclusiva da economia de reutilização e reciclagem ao contabilizar o custo de coleta e processamento criam o risco de baterias abandonadas, evidenciando que a logística reversa sem tecnologias de informação e segurança é falha.

Em convergência à busca por superar essa inviabilidade e os riscos de abandono de resíduos, outros autores demonstram que encurtar a cadeia e internalizar processos é a solução mais eficaz. Scheller, Schmidt e Spengler (2023) verificaram que, com o crescimento da demanda por carros elétricos, a transformação para cadeias de suprimentos em circuito fechado é benéfica para suportar o aumento na demanda de baterias. Os autores provam que as chamadas "fábricas circulares" superam todas as outras estruturas de rede no curto prazo justamente devido à produção interna e às curtas distâncias de transporte, conseguindo neutralizar a escassez de materiais e as flutuações de preço.

Essa mesma perspectiva de otimização operacional por meio do encurtamento das distâncias logísticas é defendida por Pilla Jr., Pimenta e Oliveira (2024) ao analisarem o fluxo reverso de resíduos plásticos no agronegócio. Os pesquisadores identificaram que a estruturação tradicional da logística reversa de embalagens de defensivos agrícolas esbarra em sérios entraves de viabilidade financeira, sobretudo em razão dos custos proibitivos de frete decorrentes do transporte de volumes pulverizados por longas distâncias. Diante desse cenário,

a proposição de circuitos curtos regionalizados desponta como uma estratégia de triplo benefício: além de viabilizar a operação ao reduzir as despesas com transporte, promove a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e estimula o desenvolvimento socioeconômico local por meio da geração de empregos regionais. Trata-se, por conseguinte, de um mecanismo indispensável para dar cumprimento pragmático às exigências de responsabilidade compartilhada impostas pela legislação ambiental vigente

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este tópico apresenta os procedimentos metodológicos adotados para alcançar o objetivo geral deste trabalho, que consiste em analisar como os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia.

Para delimitar espacialmente o estudo, a pesquisa de campo foi conduzida junto a empresas atuantes no município de Uberlândia (Minas Gerais) e região. A escolha desta localidade justifica-se por sua expressiva adoção da tecnologia solar fotovoltaica, figurando como um polo de destaque na geração distribuída nacional, o que a torna um cenário ideal e representativo para investigar os impactos do passivo de resíduos e a viabilidade operacional das cadeias curtas.

Para atingir esse propósito, a pesquisa classifica-se, quanto aos seus objetivos, como um estudo de natureza exploratória. Essa classificação justifica-se pela incipiência de investigações empíricas sobre a modelagem de cadeias curtas aplicadas à logística reversa e reciclagem de resíduos fotovoltaicos no contexto brasileiro, demandando um esforço inicial de esclarecimento e refinamento conceitual (Gil, 2012). Quanto à abordagem, adotou-se a pesquisa qualitativa, adequada para compreender a complexidade das interações operacionais, barreiras mercadológicas e percepções estratégicas dos diversos atores da cadeia, elementos que não seriam capturados de forma isolada por métricas quantitativas. A coleta de dados primários realizou-se por meio de entrevistas semiestruturadas. A opção por essa técnica permitiu conduzir as investigações com flexibilidade e riqueza de detalhes a partir de roteiros previamente definidos (Yin, 2015), garantindo a captura de perspectivas empíricas e complementares de múltiplos elos que compõem o ecossistema fotovoltaico regional.

Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática da literatura sobre a reciclagem e o aproveitamento de resíduos fotovoltaicos. Na sequência conduziram-se entrevistas semiestruturadas com integradores locais, distribuidores e demais agentes do setor, visando mapear o cenário atual de destinação de módulos danificados ou em fim de vida útil (EOL), bem como a viabilidade de sua inserção em uma Cadeia de Suprimentos Curta (CSC) regional.

3.1.Coleta de Dados

Para garantir a abrangência do estudo e atender aos critérios de rigor metodológico, a coleta de dados não se restringiu a uma única origem, sendo realizada por meio de múltiplas fontes de evidência (Yin, 2015). Essa estratégia baseou-se em três frentes principais: a pesquisa documental, a observação direta e as entrevistas semiestruturadas.

A pesquisa documental consistiu na extração de dados secundários a partir de legislações vigentes e relatórios oficiais de mercado. Foram analisados o Estudo Estratégico de Geração Distribuída (Greener, 2024), que fornece o panorama de mercado e o volume de descarte relatado por integradores no Brasil, e o relatório global *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels* (Irena, 2016). Adicionalmente, mapeou-se o arcabouço legal aplicável, como a Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) e o trâmite do Projeto de Lei nº 3.784/2023.

Para a seleção dos 15 participantes da pesquisa de campo, adotou-se a amostragem não probabilística por conveniência e por julgamento, combinada com a técnica de bola de neve (*snowball sampling*) (Biernacki; Waldorf, 1981). As empresas regionais responsáveis pela comercialização e instalação dos sistemas fotovoltaicos, chamadas de integradores, foram selecionadas segundo os seguintes critérios de inclusão: (1) a empresa deveria atuar formalmente no mercado de energia solar (2) o entrevistado deveria ser sócio proprietário ou ocupar cargo de gestão com poder de decisão sobre a logística ou destinação de equipamentos e (3) a empresa deveria ter experiência prévia ou estar diretamente impactada por casos de avarias ou descarte de módulos fotovoltaicos. O processo de aproximação foi favorecido pela inserção profissional do pesquisador como integrador atuante no mercado fotovoltaico regional. Esse posicionamento como *insider* facilitou o acesso inicial ao campo e o estabelecimento de uma relação de confiança mútua, permitindo o recrutamento de três integradores e um distribuidor por meio de contatos diretos, além de mais um distribuidor e um integrador

identificados em grupos setoriais de comunicação. A planta de reciclagem especializada foi contatada sucessivamente via canais digitais até a realização de uma entrevista remota e uma outra presencial durante visita técnica. Estas oito entrevistas foram semiestruturadas, seguindo os roteiros pré-definidos conforme apêndices, sendo que sete delas foram gravadas (cinco via plataforma Google Meet e duas vias gravador de voz por telefone/visita) e uma registrada por anotações devido à opção do distribuidor por não ter a voz gravada.

A partir dessas interações, a técnica de indicação em cadeia *snowball* (bola de neve) (Biernacki; Waldorf, 1981), em que os primeiros entrevistados indicaram novos participantes estratégicos que poderiam agregar conhecimento à pesquisa, foi mobilizada para mapear e engajar os demais atores da cadeia reversa e do ecossistema de destinação regional (conforme detalhado na Tabela 1), encerrando-se a coleta ao atingir a saturação teórica (Glaser; Strauss, 1967/2017; Bauer; Gaskell, 2002) com 15 entrevistas, momento em que as novas entrevistas deixaram de trazer informações inéditas ao escopo do estudo. Desta forma, foram entrevistados além de distribuidores, integradores e recicladores, gestores de resíduos sólidos, de resíduos industriais, de aterros industriais, de caçambas para descarte e pesquisador na área de materiais. Estas entrevistas trouxeram contribuições relevantes para o trabalho, visto que foram direcionadas para responder aos mesmos eixos temáticos do estudo (gargalos operacionais, viabilidade de cadeia curta e destinações atuais). Estas sete entrevistas compreenderam 2 diálogos informais registrados via anotações detalhadas de campo logo após as visitas presenciais (ecoponto e reciclador regional de vidro), 3 conversações estruturadas de perguntas e respostas síncronas via aplicativo WhatsApp com gestores de aterro, caçambas e resíduos industriais e duas entrevistas via plataforma Google Meet (Gestor de resíduos eletroeletrônicos e Pesquisador na área de materiais).

A equivalência e a adequação do conteúdo das respostas obtidas por esses diferentes meios de registro — incluindo as interações via WhatsApp® — foram preservadas. Embora as mídias e o nível de formalidade tenham variado para se ajustar à realidade prática de cada ator, todos os contatos foram direcionados para responder aos mesmos eixos temáticos do estudo (como fluxos operacionais, custos logísticos, destinações atuais e barreiras à reciclagem). As interações por texto e áudio no WhatsApp® e as notas das conversas informais de visitas renderam informações operacionais e regulatórias específicas (como tarifas de aterro, logística de caçambas e processamento local de vidro) de profundidade analítica equivalente às entrevistas formais, adequadas para a codificação conceitual e a triangulação das evidências. Esses dados foram integralmente catalogados, submetidos ao mesmo processo de codificação

temática e validados por meio de triangulação cruzada com relatórios setoriais (GREENER, 2024) e com o referencial teórico de logística reversa e economia circular.

A seguir tabela resumo com a qualificação das entrevistas:

Tabela 1 - Lista de entrevistados por área de atuação

Área de Atuação	cargo	Quantidade de entrevistados
Aterro Industrial	Consultor Comercial	1
Caçambas para descarte	Sócio-Proprietário	1
Distribuidor de material fotovoltaico	Diretor de relações institucionais, Sócio-Proprietário	2
Gerenciamento de resíduos industriais	Gerente Administrativo	1
Gestor de resíduo eletroeletrônico	Diretor Administrativo	1
Instituição de Educação	Pesquisador	1
Integrador	Sócio-Proprietário, Gerente Administrativo	4
Ponto de recebimento de resíduos	Encarregado	1
Reciclador regional	Sócio-Proprietário	1
Reciclagem de placas fotovoltaicas	Sócio-Proprietário, Diretor de Operações	2
Total Geral		15

Fonte: Elaborado pelo autor

Como se depreende da Tabela 1, a amostra de 15 participantes caracteriza-se por um elevado nível de qualificação profissional e de poder de decisão dentro dos respectivos elos de atuação, configurando um grupo de informantes-chave qualificado e representativo para o escopo do estudo. Do total de consultados, 8 sujeitos são sócios-proprietários de suas organizações e os demais ocupam cargos de alta gestão, tais como diretores de relações institucionais, diretores de operações, gerentes administrativos e consultores técnicos. Essa composição assegura que os dados coletados reflitam visões estratégicas e de tomada de decisão mercadológica de ponta a ponta na cadeia de custódia do painel fotovoltaico: desde a distribuição comercial e integração de sistemas (6 entrevistados), passando pela operação especializada de reciclagem e processamento regional de materiais (3 entrevistados), até a infraestrutura final de destinação e regulação de resíduos sólidos e industriais (5 entrevistados), contando ainda com o respaldo científico de um pesquisador da área de ciência de materiais.

Cabe ressaltar que, embora a delimitação espacial do estudo tenha como foco a região de Uberlândia (polo gerador dos resíduos), as entrevistas com os elos de reciclagem e de distribuição abrangeram atores com operações fisicamente distantes do local de instalação das

usinas. A pesquisa de campo englobou uma planta de reciclagem localizada em Valinhos (SP) e duas distribuidoras de equipamentos, sendo uma sediada em São José do Rio Preto (SP) e outra sediada em São Paulo (SP) — esta última representada na pesquisa por um gestor estrategicamente alocado em Belo Horizonte (MG). Essa abrangência geográfica fez-se estritamente necessária devido à atual centralização da infraestrutura de distribuição e de processamento fotovoltaico no Brasil. Como não existem plantas de reciclagem de painéis na região de Uberlândia, os atores entrevistados fora do município representam exatamente os elos reais com os quais os integradores locais precisam interagir para tentar realizar a logística reversa. Tal configuração evidencia empiricamente o gargalo logístico das longas distâncias, corroborando a necessidade e justificando a proposição das cadeias curtas neste trabalho.

Conforme detalhado, as oito entrevistas formais de caráter semiestruturado foram conduzidas estritamente a partir dos roteiros pré-definidos, ao passo que as demais interações e diálogos guiaram-se de forma flexível pelas mesmas diretrizes de investigação. Os instrumentos e abordagens de coleta foram elaborados para explorar os seguintes eixos temáticos: as tratativas atuais e as destinações dadas às placas fotovoltaicas com defeito ou em fim de vida útil (EOL) na região de Uberlândia; as principais causas de remoção dos equipamentos dos sistemas instalados; a representatividade do volume de descarte em relação ao total comercializado; e as percepções dos atores sobre a viabilidade de alternativas de reaproveitamento sob a ótica de cadeias curtas.

A empresa de reciclagem existente e formalmente atuante no mercado nacional foi entrevistada visando conhecer os processos atuais e produtos da reciclagem para verificar a viabilidade de produtos e processos regionais para introduzir a cadeia curta no tratamento de resíduos das placas fotovoltaicas. Neste caso buscaram-se os responsáveis pelo processo de logística e reciclagem buscando maior assertividade do processo atual e planos para o futuro.

As interações formais foram realizadas, em sua grande maioria, de forma remota — apresentando duração de 30 a 45 minutos, utilizando plataformas de videoconferência (como Google Meet) ou chamadas telefônicas. Em todos os casos, foram gravadas através de aplicativos específicos para *smartphone*, solicitando-se inicialmente autorização para seu uso no trabalho e uma apresentação do cargo do respondente e do perfil da empresa, relatando seu tempo de mercado e número de sistemas fotovoltaicos instalados, aplicando-se na sequência o questionário da pesquisa previamente elaborado. Destaca-se, contudo, uma exceção metodológica de grande relevância para a validação empírica deste estudo: no caso da empresa de reciclagem de módulos fotovoltaicos, além da entrevista remota conduzida com a sócia-

diretora, foi realizada uma visita técnica presencial às instalações da planta (em Valinhos, SP). Essa visita permitiu a condução de uma segunda entrevista semiestruturada com o Diretor de Operações, bem como a observação direta do processo técnico de separação e reaproveitamento físico dos componentes. A inclusão dessa observação *in loco* atende aos preceitos de Yin (2015) sobre o uso de múltiplas fontes de evidência, enriquecendo a triangulação dos dados e a compreensão prática dos desafios operacionais da cadeia.

A entrevista foi realizada por meio de um formulário de pesquisa elaborado visando avaliar o histórico de casos com inutilização de placas fotovoltaicas e as tratativas atuais dadas às placas fotovoltaicas com defeito ou em fim de vida útil. Dessa forma, foram compreendidos os motivos da destinação atual e a viabilidade de alternativas, tendo em vista a situação das placas. Incluíram-se ainda as principais causas de sua remoção do sistema e o volume que representam frente ao total comercializado, buscando verificar quais são os modelos e processos de destinação final das placas fotovoltaicas e identificando para onde vão as placas atualmente após o fim de seu uso em Uberlândia.

Cabe ressaltar que a condução da pesquisa de campo seguiu os procedimentos éticos aplicáveis a estudos científicos com seres humanos (Pilla Jr.; Pimenta; De Oliveira, 2024). Assegurou-se a todos os participantes o direito ao consentimento livre e esclarecido, à privacidade, à confidencialidade das informações mercadológicas e ao total anonimato pessoal e corporativo, motivo pelo qual os respondentes são identificados nos resultados apenas por seus elos de atuação na cadeia. Adicionalmente, a gravação em áudio das conversas ocorreu estritamente mediante a autorização expressa de cada indivíduo, destinando-se os registros de forma exclusiva para a transcrição e a análise acadêmica dos dados.

Para a estruturação das investigações de campo e do mapeamento do fluxo reverso, fez-se necessário compreender as atribuições operacionais e a interdependência de múltiplos atores que integram o ecossistema fotovoltaico e de destinação final. Embora os instrumentos formais e padronizados de entrevista (detalhados nos Apêndices A, B e C) tenham sido originalmente desenhados para explorar os três elos fundamentais da cadeia solar, a realidade empírica do campo demandou a extensão das interações para uma rede de apoio na gestão de resíduos sólidos. Assim, os papéis operacionais investigados estruturaram-se nas seguintes frentes:

Distribuidores: Atuam como o elo atacadista, adquirindo os equipamentos em grande volume dos fabricantes e fornecendo-os para o mercado local. Na logística reversa atual, são frequentemente os principais acionados para receber as placas danificadas, atuando como intermediários em processos de acionamento de garantia.

Integradores: São as empresas responsáveis pela ponta da cadeia, adquirindo os equipamentos dos distribuidores para realizar a venda, o projeto e a instalação nas unidades consumidoras. Por estarem na linha de frente com o cliente final, são os agentes que realizam a remoção física das placas danificadas ou em fim de vida útil (EOL), lidando com a “dor” inicial de armazenar e dar um destino a esse passivo.

Empresas de Reciclagem: Representam o elo de processamento e reinserção dos resíduos na economia circular. Elas dependem da captação e consolidação do volume de placas descartadas pelos integradores e distribuidores para realizar a recuperação de materiais.

Atores de Gestão e Destinação de Resíduos (Frente Complementar): Compreendem operadores de aterros industriais, gestores de caçambas, encarregados de pontos de entrega voluntária (ecopontos) e recicladores regionais de materiais de massa (como vidro), cuja infraestrutura e cooperação local são indispensáveis para viabilizar e escoar as operações descentralizadas de uma cadeia curta regional.

A relação de interdependência entre esses múltiplos atores constitui o motor da logística reversa no setor: enquanto distribuidores e integradores demandam rotas viáveis e economicamente acessíveis para escoar os resíduos das usinas, as recicladoras especializadas e os agentes de destinação final dependem de fluxos consolidados e constantes para viabilizar suas operações. É justamente a investigação dos gargalos atuais e as oportunidades de otimização nessa rede estendida — com foco na relação triangular primária que ancora o fluxo reverso (distribuidor, integrador e reciclador) — que norteou a elaboração das diretrizes de campo e dos três roteiros de pesquisa apresentados a seguir:

3.1.1. Roteiro para integradores:

A construção deste roteiro foi fundamentada diretamente nas lacunas e constatações levantadas no referencial teórico (Capítulo 2). As perguntas iniciais, focadas em volume e motivos de defeito, baseiam-se nas projeções de crescimento de resíduos da Agência Internacional de Energia Renovável (Irena, 2016) e nos fatores de degradação estrutural apontados por Vinayagamoorthi et al. (2024). As questões sobre a destinação atual e os altos custos logísticos buscam validar empiricamente a inviabilidade das longas distâncias alertada por De Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024) e El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022). Por fim, a investigação sobre a criação de produtos regionais ancora-se nos princípios de

Cadeias Curtas de Suprimentos propostos por Kiss, Ruszkai e Takács-György (2019) e nas estratégias de reuso sugeridas por Al Zaabi e Ghosh (2024). Com base nisso, elaborou-se o roteiro de entrevista com foco no volume de descarte, tempo de vida útil dos módulos e motivos de defeito nos módulos, cujo conteúdo integral encontra-se detalhado no **Apêndice A**.

3.1.2. Roteiro para empresa de reciclagem:

O roteiro de entrevista direcionado às empresas de reciclagem foi estruturado para investigar o processo técnico de processamento, a viabilidade comercial dos subprodutos e os desafios de captação logística de módulos avariados. As questões iniciais, voltadas à dinâmica operacional e às etapas de separação física, térmica ou química dos componentes, fundamentam-se nas soluções tecnológicas revisadas por Wang et al. (2022), Maghraby et al. (2025) e Lim et al. (2022). Em seguida, para avaliar a atratividade comercial e a viabilidade financeira da recuperação de materiais nobres (como prata, silício e alumínio), o roteiro apoia-se nas premissas de viabilidade de mercado propostas por Gönen e Kaplanoğlu (2019) e Venkatachary et al. (2020). Por fim, os questionamentos sobre o alcance geográfico da planta e a factibilidade de descentralizar o processamento em base regional ancoram-se nas discussões de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) sobre as barreiras espaciais e a necessidade de redução das distâncias de transporte.

O roteiro de entrevista para a empresa de reciclagem encontra-se detalhado no **Apêndice B**

3.1.3. Roteiro para distribuidores

Por sua vez, o roteiro elaborado para os distribuidores (Apêndice C) teve como foco compreender o funcionamento da logística reversa formal, a percepção sobre a viabilidade das cadeias curtas na reciclagem, as obrigações regulatórias do setor, as tratativas dadas aos equipamentos recolhidos por garantias, o desenvolvimento de produtos de interesse local, a identificação de produtos oriundos da reciclagem, verificando seus benefícios à economia regional e as oportunidades de reinserção regional de materiais. A investigação sobre os volumes transacionados e o funcionamento operacional do retorno de garantia apoia-se nos debates de M. S. Chowdhury et al. (2020) e El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) sobre

a responsabilidade estendida do produtor e do distribuidor no ciclo de fim de vida útil (EOL) dos equipamentos. Complementarmente, os questionamentos sobre a viabilidade de descentralizar a reciclagem e desenvolver produtos circulares de interesse local foram fundamentados no modelo de economia circular e redução de rotas de transporte proposto por Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024). Por fim, as perguntas voltadas a avaliar o dinamismo econômico regional, a sustentabilidade e o valor gerado pela proximidade geográfica entre os elos da cadeia reversa amparam-se nos conceitos logísticos de circuitos curtos discutidos por Paciarotti e Torregiani (2021) e Aguiar et al. (2018).

O roteiro de entrevista completo para distribuidores encontra-se no **Apêndice C**

3.1.4. Aspectos Éticos da Pesquisa

A condução da pesquisa de campo — englobando as etapas de coleta de dados junto aos integradores, distribuidores e recicladores — seguiu rigorosamente os preceitos éticos recomendados para investigações científicas. Sobre as questões éticas do trabalho, declara-se que o conteúdo se trata de uma pesquisa de opinião pública, sem identificação de participantes e que objetiva o aprofundamento teórico da gestão da implementação de cadeias curtas de reciclagem de placas fotovoltaicas, com base em situações que emergem espontaneamente e contingencialmente na prática profissional. Tal metodologia empregada no trabalho é amparada pelo Parágrafo único, Incisos I e VII da RESOLUÇÃO Nº 510, DE 07 DE ABRIL DE 2016 do Conselho Nacional de Saúde, que normatiza pesquisas em Ciências Humanas e Sociais cujos procedimentos metodológicos envolvam a utilização de dados diretamente obtidos com os participantes ou de informações identificáveis ou que possam acarretar riscos maiores do que os existentes na vida cotidiana.

Conforme o Parágrafo único da Resolução nº 510, de 07 de abril de 2016, não serão registradas nem avaliadas pelo sistema CEP/CONEP:

I – pesquisa de opinião pública com participantes não identificados;

VII - pesquisa que objetiva o aprofundamento teórico de situações que emergem espontaneamente e contingencialmente na prática profissional, desde que não revelem dados que possam identificar o sujeito.

De forma a tornar mais claro o contexto da referida pesquisa, cabe destacar o Capítulo I, Item XIV da mesma Resolução mencionada acima:

XIV – pesquisa de opinião pública: consulta verbal ou escrita de caráter pontual, realizada por meio de metodologia específica, através da qual o participante, é convidado a expressar sua preferência, avaliação ou o sentido que atribui a temas, atuação de pessoas e organizações, ou a produtos e serviços; sem possibilidade de identificação do participante.

Desta forma, sob a ótica da referida norma, o trabalho não deve ser registrado nem avaliado pelo sistema CEP/CONEP.

3.2. Análise de dados

A análise dos dados coletados nas entrevistas seguiu o método de Análise de Conteúdo proposto por Bardin (2011). Segundo a autora, este método consiste em um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter, por procedimentos sistemáticos, indicadores que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção dessas mensagens. A aplicação prática do método de Bardin (2011) foi operacionalizada de forma sistemática por meio de três polos cronológicos fundamentais:

No polo da pré-análise, realizou-se a fase de organização do material de campo por meio da transcrição literal e manual-corretiva das interações gravadas via software *turboscribe.ai*, seguida de uma leitura flutuante para o estabelecimento das hipóteses iniciais e do corpus textual da pesquisa.

Na etapa de exploração do material, procedeu-se à codificação aberta das transcrições e das notas de campo. Adotou-se a frase (unidade de significação semântica) como Unidade de Registro (UR), para a extração dos códigos, e o parágrafo como Unidade de Contexto (UC) para preservar o sentido das declarações dos sujeitos. Os fragmentos foram catalogados em planilhas eletrônicas e consolidados por meio de tabelas dinâmicas, permitindo a quantificação das frequências de citação para fins de análise de relevância temática.

Por fim, no polo do tratamento dos resultados, inferência e interpretação, os códigos brutos foram agrupados por afinidade e homogeneidade, respeitando o princípio da exclusividade mútua de Bardin (2011), o que culminou na estruturação das seis categorias analíticas do estudo. Estas categorias estruturaram-se sob duas naturezas distintas: (i) categorias dedutivas (*a priori*), derivadas diretamente do referencial teórico construído para o estudo,

compreendendo as dimensões de Cadeia Comum (ancorada nos gargalos logísticos e custos de frete tradicionais) e Cadeia Curta (focada nas perspectivas de reaproveitamento e desenvolvimento regional); e (ii) categorias indutivas (a posteriori), que emergiram espontaneamente da realidade empírica relatada pelos atores de campo, englobando as dinâmicas de Destinação, Motivos de Defeito, Processos de Reciclagem e Regulamentação, Políticas Públicas e Desafios de Conformidade. A partir dessa categorização, as evidências empíricas foram submetidas à triangulação cruzada com dados documentais do setor (Greener, 2024; Irena, 2016) e interpretadas à luz da teoria de logística reversa e economia circular.

3.3. Qualidade da pesquisa

Para assegurar o rigor científico, a validade e a confiabilidade dos achados, adotaram-se as diretrizes e táticas propostas por Yin (2015) para o design de estudos qualitativos. O controle de qualidade e a salvaguarda metodológica da investigação estruturou-se em três frentes integradas:

A validade do construto foi assegurada por meio da triangulação de múltiplas fontes de evidência durante a etapa de coleta de dados. Beneficiando-se da inserção profissional do pesquisador como integrador atuante no mercado de Uberlândia, a aproximação com os participantes foi facilitada por uma relação prévia de confiança mútua. A partir disso, os dados foram coletados e cruzados sistematicamente através de frentes complementares: as interações dinâmicas via WhatsApp® (mensagens e áudios com gestores operacionais de caçambas, aterros e resíduos industriais), que revelaram a realidade diária de custos e descartes locais; as entrevistas qualitativas formais (via Google Meet e telefone), que trouxeram o posicionamento estratégico e de longo prazo de sócios e diretores de distribuidoras e recicladoras; e as observações in loco (visitas presenciais às instalações de reciclagem em Valinhos-SP e a ecopontos locais em Uberlândia), que permitiram confrontar os discursos com a realidade prática e tecnológica do processamento dos materiais. Importa destacar que mesmo os dados obtidos de forma mais flexível, como as comunicações cotidianas pelo WhatsApp®, foram integralmente transcritos, catalogados e submetidos à mesma análise de conteúdo e codificação categorial de Bardin (2011) aplicada às entrevistas tradicionais, sendo posteriormente cruzados com os dados de relatórios consolidados do setor (como Irena, 2016 e Greener, 2024). Essa rica sobreposição de olhares, unindo a prática do pesquisador, o pragmatismo das mensagens

rápidas, a profundidade dos depoimentos estruturados e o realismo das visitas físicas, mitigou vieses de fontes únicas e possibilitou um diagnóstico mais completo e fiel à realidade interorganizacional do setor fotovoltaico regional, cujos confrontos empíricos detalhados são avaliados no Capítulo 4.

A validade externa, que em investigações qualitativas de caso refere-se à generalização analítica (e não estatística), foi operacionalizada por meio de uma análise multi-ator e interorganizacional. O procedimento consistiu no cruzamento das falas de sujeitos pertencentes a elos distintos da cadeia de suprimentos estendida. A validação conceitual foi alcançada ao confrontar as demandas e gargalos relatados por um elo (como os integradores) com as restrições logísticas, custos operacionais e limitações técnicas dos elos subsequentes (como recicladores e distribuidores). Esse alinhamento procedimental garantiu que as barreiras mapeadas fossem identificadas sob uma perspectiva sistêmica e estrutural da rede reversa, extrapolando o contexto de organizações isoladas.

A confiabilidade do estudo foi garantida pelo desenvolvimento de um banco de dados do caso estruturado e rastreável, viabilizando uma trilha de auditoria completa. Esse repositório metodológico compreende os registros originais de áudio, as transcrições literais geradas pelo software *turboscribe.ai* com posterior revisão manual de jargões técnicos pelo pesquisador, as notas estruturadas de campo das observações presenciais e as planilhas dinâmicas de categorização temática. A parametrização documentada de todo o processo de análise de conteúdo (Bardin, 2011) assegura a replicabilidade do estudo por pesquisadores independentes, garantindo a estabilidade e a confiabilidade de todo o processo interpretativo, permitindo a recuperação da informação original a qualquer momento da análise.

3.4 Matriz de Consistência Metodológica

Com o intuito de sintetizar os procedimentos metodológicos adotados e demonstrar o alinhamento lógico entre o problema de pesquisa, os objetivos propostos e as técnicas de coleta e análise de dados, elaborou-se a matriz de consistência metodológica do estudo (Quadro 4). Esta ferramenta permite visualizar como cada etapa empírica e teórica foi estruturada para responder à inquietação central desta dissertação.

Problema de pesquisa:	Como os princípios das cadeias curtas de suprimento podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia, com ênfase na reciclagem, no desenvolvimento de produtos e no comércio regional?		
Objetivo geral:	Analisar como os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia		
Objetivos específicos	Fonte de dados	Instrumentos de coleta de dados	Técnicas de análise de dados
Mapear a situação atual de destinação dos resíduos de placas fotovoltaicas na região de Uberlândia por meio da condução de entrevistas semiestruturadas com integradores locais, distribuidores e recicladores que atendem ou possam atender a região	Atores da cadeia de suprimentos fotovoltaica (Integradores, Distribuidores e Empresa de Reciclagem)	Entrevistas em profundidade (semiestruturadas) e observação direta in loco	Pré-análise e transcrição das gravações (Software turboscribe.ai)
Identificar, a partir da análise de conteúdo e categorização temática dos dados coletados em campo, as oportunidades de processamento regional e os produtos que podem vir a ser produzidos a partir dos componentes das placas fotovoltaicas ou que tenham algum componente em comum com elas.	Transcrições das percepções empíricas dos entrevistados (15 entrevistas até a saturação teórica)	Roteiros de entrevista segmentados por elo da cadeia técnica (Apêndices A, B e C)	Análise de Conteúdo (BARDIN, 2011): codificação, categorização e análise de frequência
Propor um framework prático (Matriz de Transição e Ações Estratégicas) que utilize os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos para mitigar custos logísticos e fomentar a economia circular dos resíduos fotovoltaicos no contexto regional	Resultados cruzados da pesquisa de campo empírica com as lacunas do referencial teórico	Triangulação de múltiplas fontes de evidências (YIN, 2015)	Inferência qualitativa, interpretação dos resultados e formulação de proposições (Quadros 8 e 9)

Quadro 4 - Matriz de Consistência Metodológica

Fonte: Elaborado pelo autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Explicação das categorias

Visando melhor avaliar as principais contribuições das entrevistas, foi feita uma categorização por temas, levando às seguintes categorias: cadeia comum, cadeia curta, destinação, motivos de defeito, processos de reciclagem e regulamentação, políticas públicas e desafios de conformidade. A categorização visou verificar os diversos aspectos abordados referente às tratativas para placas que não mais estariam sendo usadas nas usinas e dentro de cada categoria,

criaram-se códigos como subitens para melhor avaliar a contribuição das entrevistas. Foram diversos códigos, sendo que alguns se repetiram em mais de uma categoria.

4.2. Aspectos de gestão em cadeias comuns e cadeias curtas

Código	Cadeia Curta	Cadeia Comum	Total de citações
Logística reversa		33	33
Produtos	18		18
Custo operacional		18	18
Acompanhamento da demanda		11	11
Economia circular	7	3	10
Formação de preço		9	9
Impactos na Sustentabilidade	1	8	9
Viabilidade econômica	8		8
Desenvolvimento de pesquisa	8		8
Processamento local	8		8
Novas tecnologias		7	7
Vantagens	6		6
Mobilidade da recicladora	6		6
Rastreabilidade		4	4
Posicionamento de marketing	4		4
Reciclagem	3		3
Total de citações	69	93	162

Quadro 5 - Processos de Gestão em Cadeias de Suprimentos

Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 5 consolida a frequência dos códigos emergentes relacionados aos processos de gestão, segregando-os entre a dinâmica real e vigente (Cadeia Comum) e o cenário propositivo regionalizado (Cadeia Curta), onde os entrevistados foram convidados a avaliar os possíveis impactos de sua implantação. Longe de constituírem meras etiquetas descritivas, esses códigos representam as dimensões operacionais e financeiras que ditam a viabilidade do fluxo reverso no setor. Sob a perspectiva da Cadeia Comum, os códigos de Logística Reversa, Custo Operacional e Formação de Preço emergem não apenas como variáveis isoladas, mas como fatores interdependentes que revelam a assimetria econômica apontada por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022). Nela, os altos custos de movimentação geográfica pulverizada inviabilizam a rentabilidade da reciclagem.

Por outro lado, na dimensão da Cadeia Curta, os códigos de Produtos, Processamento Local e Viabilidade Econômica passam a ser investigados sob o prisma dos circuitos curtos de

economia circular descritos por Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024), nos quais a proximidade territorial atua como o principal vetor de redução de custos de transação e retenção de valor na própria região.

A análise aprofundada dos depoimentos revela que a principal preocupação dos agentes orbita o código de Logística Reversa (33 citações). Os relatos de campo evidenciam que a dispersão geográfica dos geradores de resíduos fotovoltaicos, combinada à ausência de infraestrutura local de recebimento, eleva o custo logístico a níveis proibitivos, mesmo com a organização das coletas por meio de processos de coleta compartilhada, também chamados de *milk run*. Diante desse gargalo, as falas dos entrevistados convergem para a urgência de uma coordenação integrada, evidenciando as barreiras práticas descritas a seguir:

É um produto que é altamente reciclável. O que eu vejo é só essa questão de ter volume versus frete. Não compensa você vir recolher um módulo, 10 que seja, não compensa. Ele é grande, ele é pesado, difícil de transportar e depois que está quebrado, não tem valor – Diretor de distribuidora

Um dos desafios é a demanda pulverizada. imagina uma demanda pulverizada que ela vai falar assim eu tenho 30 pontos para coletar 60 placas em cada ponto espalhadas pelo estado do Paraná. imagina toda essa logística para fazer tudo isso convergir e vir para cá. O custo disso, sendo que a pessoa, que normalmente é um CPF, ela só quer tirar essa meia dúzia de placas daqui da minha casa, está ocupando meu espaço – Gerente de empresa de reciclagem

Além disso, ainda no tema logística reversa, a presença de componentes tóxicos, a dificuldade de conseguir coletas dos distribuidores para retirada de materiais avariados na descarga ou em garantia e a indefinição de um caminho para as placas em fim de vida útil (EOL) também foram citadas como dificuldades.

O código Custo Operacional (18 citações) evidencia o principal entrave financeiro da cadeia comum, caracterizando-se por uma severa assimetria na qual os custos de transação — que compreendem mão de obra para a desmontagem física manual dos módulos, frete rodoviário e armazenamento temporário de segurança — superam significativamente o valor intrínseco dos materiais passíveis de recuperação industrial. Essa barreira de viabilidade econômica, amplamente debatida por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) e D’Adamo et al. (2023), é agravada no cenário brasileiro por duas forças concorrentes: a queda acentuada nos preços de mercado de módulos novos (que reduz a atratividade de painéis de segunda mão ou materiais reciclados) e o enquadramento dos equipamentos em normas rígidas de descarte

de resíduos tecnológicos (frequentemente envolvendo o manejo controlado de metais pesados como chumbo), o que impõe exigências legais onerosas de rastreamento e transporte especializado aos prestadores de serviço. O desincentivo econômico gerado por esse desequilíbrio de fluxo reverso é detalhado nas percepções práticas a seguir:

Eu imagino que o processamento dos itens de valor desses materiais deva ficar mais caro, o custo, do que o benefício do próprio material. E isso dificulta toda a cadeia. Então, você tem um desincentivo econômico para o integrador, que não tem remediação desse custo, você tem um desincentivo econômico para o distribuidor, que tem uma logística cara para fazer isso, então, no final das contas, não haver um benefício econômico. – Diretor-proprietário de Integrador

Imagina, há 3 anos atrás, um módulo fotovoltaico custava R\$ 1.500, hoje custa abaixo de R\$ 500. Então está impactando muito no valor do frete, é algo muito volumoso, tem mais de 2 metros. Os pequeninhos eram menor e pesavam 20 quilos, agora está pesando 40 quilos. – Distribuidor

Ainda em cadeia comum houve significativas citações alertando que o volume atual de avarias ou placas em fim de vida útil ainda é muito baixo, levando a uma falta de contabilização e preocupação com o tema. Entretanto, todos acreditam no crescimento desse volume e inclusive na relevância de um acompanhamento da demanda para tratativas futuras.

A gente não contabiliza separadamente. Então o que entra aqui entra como resíduo eletroeletrônico. Não entra especificamente como informática, como fotovoltaico, entendeu? Entra X quilos de material eletroeletrônico. Então eu não tenho essa contabilização certinha para poder te passar. Mas o que eu te digo é que foi muito pouco – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

A gente tem modelagens que a gente faz própria, que considera todos os locais que estão, que tem usinas instaladas, o ano da instalação, o tipo de painel e quando, aí o principal desafio é quando que ela vai trocar os painéis, né, então é estimar o fim de vida, porque muitos clientes vão trocar antes dos 25 anos, alguns vão deixar 40 anos, e além desse, dessa modelagem tem a modelagem de descarte antecipado, né, então são novas usinas que quebram painéis durante construção, é container de carga que cai e a seguradora tem que acionar descarte, são, a gente chama de descarte antecipado, que aí é de um a dois anos da vida útil das usinas, no geral. Vem crescendo todos os anos. A gente tem um gráfico disso, que eu achei que estava no site, mas acho que não tem então, que é o crescimento ali, ano a ano, da coleta, e cresce todos os

anos. Não estável, não é um crescimento fixo, assim, mas é um crescimento, deu um crescimento de quase 300% entre 2023 e 2024. - Recicladora

Os impactos na sustentabilidade também foram percebidos com significância nas citações, alertando sobre itens contaminantes nas placas, incentivos ao descarte adequado e melhora na imagem dos produtos.

O que está sendo vendido como extremamente sustentável pode estar gerando uma contaminação no solo, que é um grande problema. Então hoje não é visto uma cadeia como um todo quando se produz o item. E aí vem os desafios depois. – Gestor de Resíduos Eletroeletrônico

A análise das declarações obtidas junto à recicladora especializada revelou aspectos críticos concernentes à Formação de Preço (9 citações) para a viabilização financeira das operações na cadeia comum. Evidenciou-se que, embora o componente logístico represente a variável mais onerosa do fluxo reverso, a composição do custo final é impactada também por custos administrativos e regulatórios indiretos, tais como o processo burocrático de emissão de certificados de destinação adequada e as despesas com pessoal para a gestão de conformidade. Ademais, a atratividade econômica do reprocessamento industrial mostra-se sensível à oscilação das cotações de mercado dos materiais nobres recuperados (como a prata e o silício) e ao timing comercial estratégico para a comercialização desses subprodutos. A necessidade relatada de estocar os materiais à espera de uma demanda regional favorável — motivada pela ausência de tabelas oficiais de preços para resíduos básicos de massa, como o vidro temperado — encontra perfeito respaldo analítico nas modelagens financeiras de D’Adamo (et al., 2023), as quais demonstram que a lucratividade e a sustentabilidade de longo prazo das plantas de reciclagem de módulos fotovoltaicos são diretamente condicionadas à elevada volatilidade do mercado de mineração urbana.

O que acontece a gente sabe do valor, por exemplo não existe uma tabela como se fosse a LME para definir o valor do vidro como tem para o alumínio, para o cobre, para o ferro, para gasolina, sei lá, para qualquer outra coisa mas a gente tem noção do valor em centavos por quilo que isso tem então quando a gente tem uma proposta que não compensa financeiramente deixa aqui, a gente estoca, quando for necessário a gente vai encontrar o cliente com uma demanda que encaixa com a nossa oferta – Recicladora

Das entrevistas foi possível verificar também o surgimento de novas tecnologias e outros itens que poderão ser fontes para pesquisas similares e deverão gerar preocupação na sociedade como os inversores das usinas solares e as baterias de lítio, usadas não apenas para armazenagem de energia em usinas, mas nos carros elétricos, além, é claro, da própria evolução tecnológica dos módulos.

Eu acredito que um problema maior que placas sejam até os inversores. eu estou com sete inversores aqui, né? Guardados aqui. Fora uma quantidade de micro que tem. Aí, o que acontece? O fabricante até manda um novo, aí fala que vai ter coleta... Como é que fala lá? Vai voltar para coletar depois, acaba não voltando, para ele ficar mais caro ele coletar do que ele... Largar mais. É, né? Então, tem um monte de inversor e micro aqui que o pessoal deu defeito e pronto. - Integrador

Nós estamos fazendo migração do carro, da combustão, para o carro elétrico. As baterias de chumbo ácido estão indo embora, estão vindo as de lítio, e da mesma forma vai começar um desafio gigantesco, porque vai vir a bateria de lítio que os caras não sabem o que fazer, aquilo pega fogo muito fácil, e aí torna-se um desafio muito grande – Gestor de Resíduos Eletroeletrônico

Como último item citado em cadeias comuns, observa-se a rastreabilidade, que foi citada como relevante para identificar módulos que foram retirados das usinas e foram reaproveitados.

Geralmente tem essas cooperativas de reciclagem, elas recebem alguns incentivos, então, além do motivo, elas têm que prestar conta sobre isso. Agora, não sei como seria esse rastreio, mas de fato é importante, sim, para eles não acabarem fazendo um descarte indevido. – Integrador 4

A exploração da categoria Cadeias Curtas (44 citações) revela o potencial de descentralização e retenção de valor no nível regional por meio do encurtamento das distâncias de transporte e fortalecimento de redes colaborativas locais. Os achados empíricos demonstram que as propostas dos entrevistados se estruturam sob três frentes analíticas de transição circular:

- *Upcycling* local de materiais nobres: com destaque para a fácil remoção física e reinserção comercial direta do alumínio das molduras e dos cabos de cobre, convergindo com as premissas de Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024) sobre

a viabilidade de circuitos curtos para escoar resíduos de alto valor e mitigar custos logísticos de longa distância.

- Reuso estrutural secundário (*downcycling*): caracterizado pelo aproveitamento físico de módulos inteiros inativos para fins de baixo valor tecnológico (como mesas, coletores de resíduos secos, cercas, coberturas e showrooms de integradores), o que encontra amparo nas teses de Rigillo et al. (2020) sobre a regeneração colaborativa de fluxos de resíduos em base regional para evitar o descarte linear em aterros.
- Reuso funcional descentralizado (*second-life* PV): voltado à montagem de microgeradores e carregadores locais de baterias de celulares ou automóveis em ranchos e comunidades rurais isoladas, em consonância com as discussões de Al Zaabi e Ghosh (2024) sobre mercados secundários.

Entretanto, os entrevistados emitiram alertas rigorosos sobre as barreiras de segurança e de responsabilidade técnica envolvidas no manuseio desses equipamentos avariados. Em estreita consonância com os diagnósticos de Al Zaabi e Ghosh (2024) e de Tsanakas et al. (2020), evidenciou-se que um módulo fotovoltaico com vidro temperado fraturado ou trincas invisíveis na célula de silício perde sua rigidez dielétrica e capacidade de isolamento, apresentando riscos mecânicos de corte, fuga de corrente elétrica e potencial perigo de incêndio por sobrecarga térmica local (*hotspots*), o que demanda protocolos oficiais de triagem, recertificação e testes elétricos antes de qualquer destinação social segura.

Dos componentes, poderia gerar, principalmente aqui na minha região, que é mais da roça, pessoal mais simples. Então, você conseguiria fazer, por exemplo, com as placas dessas aí, aqui o pessoal vai muito para Beira de Rio, Rancho, fazer carregadores de bateria de automóvel, de celular. Seria uma opção poder desmembrar. – Integrador 4

A gente poderia usar parte desse material, por exemplo, para a confecção de coletores, por que não? Se a composição e a contaminação não forem tão característico, comprovado tão característico, poderia ir à composição de um coletor de resíduo, que não fosse ficar no tempo, que fosse só armazenar o lixo ali, eletrônico, que seja um lixo que não é molhado – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

A partir do momento que ele está quebrado ele tem risco de segurança, é um pedaço de vidro quebrado, então para o módulo que já está avariado e a gente ainda não tem uma coisa que vá fazer sentido socialmente assim, economicamente, a não ser realmente reciclar esse material, transformar ele – Gerente da Recicladora

Uma das principais citações para as cadeias curtas também é a viabilidade econômica atual. Os entrevistados citaram que o volume atual ainda é baixo e os custos para separar os componentes são elevados, o que dificulta maiores investimentos neste negócio, mas o gestor de uma distribuidora acredita no potencial futuro e a própria recicladora sinaliza possibilidade de ampliação de unidades.

Se você estivesse me chamando para ser sócio desse negócio, agora, eu falaria assim, não, não quero. Mas daqui a 10 anos, eu vou falar, quero...é algo para começar a pesquisar agora, entender agora, mas para ganhar dinheiro só daqui a 10 anos. - Diretor de Distribuidora

Então, no mínimo, a gente ter como atender estadualmente a reciclagem, e aí a gente conseguir revender os materiais dentro do próprio estado. Isso é super possível, desde que, enfim, também tenha interesse público-privado, né, em ter o container de reciclagem em cada local. – Diretora de Empresa de Reciclagem

A análise das interações com os respondentes sobre o código Mobilidade da Recicladora (6 citações) revela uma importante inovação operacional no fluxo reverso regional. Os dados de campo evidenciam que a tecnologia de processamento estruturada em contêineres móveis viabiliza o tratamento descentralizado on-site. Conforme destacado na fala do Diretor da Distribuidora, esse modelo operacional descentralizado desponta como uma solução viável e madura para grandes usinas de Geração Centralizada (GC), especialmente durante processos de *retrofit* ou descomissionamento em larga escala, indo ao encontro das táticas de *upscaling* e otimização física de processamento local defendidas por Tsanakas et al. (2020). No entanto, emergiu dos relatos um importante paradoxo logístico: a mobilidade física da unidade de reciclagem não garante, por si só, a sustentabilidade da rede se não for acompanhada pelo desenvolvimento concomitante de clientes regionais capazes de absorver localmente os subprodutos recuperados (como vidro moído e alumínio). Sob a ótica de Scheller, Schmidt e Spengler (2023) e Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024), para que a circularidade da cadeia seja plena e não gere um 'rebote logístico' — onde o frete de longa distância dos subprodutos anule a economia obtida no transporte dos módulos —, faz-se indispensável estruturar mercados receptores locais que retenham o valor econômico na própria região geradora.

A ideia é que a gente possa no futuro, quando tiver grandes descomissionamentos, a gente pode ir até o local e não precisa carregar todos os painéis e trazer eles até a recicladora física, né, o ponto físico. Mas hoje o Brasil ainda não tem essa demanda

de descomissionamento tão expressiva, então a nossa máquina fica dentro de um local
- Diretor de empresa de reciclagem de placas fotovoltaicas

A reciclagem em local só funcionaria se a gente pensar em GC. Na GDzinha de telhado, não faz sentido. Agora, na GC, já faz sentido você montar uma mini estação de tratamento ali, ou de reciclagem, numa usina que estaria passando por um *retrofit* grande. – distribuidor 1

Eu acho que um cenário possível é um projeto muito bem elaborado e falar, não, realmente eu quero repotenciar tudo isso, preciso descaracterizar uma usina inteira e aí sim vai ter um trabalho para, beleza, eu preciso encontrar fundições ali perto, comprador para isso, preciso encontrar uma empresa, uma indústria de vidro, preciso encontrar alguém que faça reciclagem de eletroeletrônico. Se levar o container para o local das usinas o resíduo vai ficar lá mas o cliente do resíduo não está lá. teria que desenvolver cliente lá ou então trazer. – Gestor da Empresa de Reciclagem

Os entrevistados comentaram ainda a importância do desenvolvimento da pesquisa para o reaproveitamento local dos módulos avariados ou em fim de vida útil. Neste sentido, foram citados o benchmarking com mercados mais maduros, a possibilidade de troca do vidro, a criação de grupos para discussão de temas voltados à sustentabilidade e a realização de um estudo de viabilidade econômica e ambiental.

A realidade é que existem caminhos diferentes, é isso que eu quero dizer, desde uma ideia bem simples, que é essa de uma mistura só, triturar a placa, pegar essa mistura, misturar com a resina, sei lá, e fazer um coletor, até tratar ela de maneira bem mais específica, tirar o silício, tirar o alumínio, tirar o chumbo, e fazer o processo de reciclagem – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Os entrevistados citaram também as vantagens esperadas das cadeias curtas: redução de custos, desenvolvimento da economia local e redução do impacto ambiental.

E o impacto ambiental é que, com certeza, muitos desses materiais acabam caindo por essa complexidade de reciclagem, acabam indo para destinos incorretos, enfim, para o meio ambiente mesmo e se degradando com o tempo, às vezes até contaminando o solo e outras formas. – integrador 2

isso vai beneficiar a população local, vai beneficiar a cidade, o Estado, isso vira marketing verde, que tem valor hoje. Tem empresas multinacionais que exigem que as empresas tenham algumas ações ligadas ao meio ambiente e preservação e isso seria uma delas. – distribuidor 1

Quanto mais próximo, mais fácil é. Nós estamos num país continental, e você for trazer placa lá do Amazonas para ser processada em São Paulo, a logística vai inviabilizar todo o processo. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Das entrevistas depreende-se também que o processo de reciclagem, a própria existência de recicladores de placas fotovoltaicas e a destinação correta dos produtos das placas ainda são temas pouco conhecidos e até por isso pouco utilizados pelos participantes da cadeia

Hoje que está pegando mais esses assuntos ambientais e as empresas estão querendo ir atrás e ver se elas se adequam a isso para poder ganhar mais visibilidade. Isso é bom para a imagem da empresa, vou comprar dele o distribuidor vou comprar de tal fornecedor fabricante de módulo porque ele tem. Estava até hoje na reunião com o fabricante que a gente está num projeto disso, de direto com o fabricante ele também já conseguir ofertar para o distribuidor dele a forma de reciclar esse material, não é só ele vender mas pensar em toda a vida útil do material, então é todo um ciclo, não é só pensar na produção e venda, não, tem que pensar no ao longo – Gestor de Empresa de Reciclagem

Eu acho que são dois pontos, assim, que eu costumo responder. Um deles é que a gente tem que batalhar muito para fazer as pessoas saberem que existe reciclagem de painel. E aí, a outra parte é o marketing direto da nossa empresa para pessoas específicas. – Diretor de empresa de reciclagem

Os códigos Impactos na Sustentabilidade (9 citações) e Economia Circular (10 citações) atuam de forma transversal na pesquisa, exercendo influência direta tanto nos gargalos operacionais da cadeia comum quanto nas projeções de viabilidade da cadeia curta. No âmbito da sustentabilidade, as percepções dos entrevistados revelam uma preocupação crítica com o passivo gerado pelos metais pesados e substâncias potencialmente tóxicas presentes na estrutura dos módulos, com destaque para o chumbo e o estanho. Conforme amplamente corroborado pelas investigações de Sharma et al. (2021) e Vinayagamoorthi et al. (2024), a destinação desses componentes a aterros sanitários convencionais ou descartes inadequados gera riscos de lixiviação ácida e contaminação de solos e águas subterrâneas. Assim, os fatores motivadores para a reciclagem apresentados em campo transcendem a mera conformidade legal, alinhando-se à preservação de reservas minerais críticas globais e ao fortalecimento da imagem institucional das empresas por meio do marketing verde. Esse alinhamento de conduta corporativa ecologicamente responsável encontra amparo conceitual nas teses de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) sobre a necessidade de mitigar o ceticismo do consumidor e consolidar a legitimidade da transição energética por meio de sistemas transparentes de rastreabilidade e circuito fechado real, estabelecendo a preocupação socioambiental como um pilar indissociável do ciclo de vida do produto fotovoltaico.

Por sua vez, o código Economia Circular (10 citações) sintetiza a dimensão operacional de fechamento e desaceleração dos ciclos de materiais, estruturando-se em campo em torno de três eixos empíricos: a reintegração sistemática dos resíduos na cadeia industrial, o reuso funcional e a viabilidade comercial das saídas de mercado. Os relatos dos respondentes demonstram que a recuperação e o reprocessamento de componentes de alto valor (como o alumínio das molduras e o cobre dos cabos) são percebidos como fatores preponderantes para viabilizar financeiramente tanto as rotas lineares clássicas quanto as soluções regionais descentralizadas de cadeia curta. Essa percepção prática valida a premissa de Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024) de que a transição circular exige arranjos de negócios integrados que mitiguem o desperdício de recursos e retenham o valor econômico dos materiais na própria cadeia. Ademais, a reintegração sistemática desses subprodutos reprocessados no mercado de massa regional atua como uma barreira protetiva contra as flutuações de preços de insumos primários, indo ao encontro das teses de mineração urbana defendidas por Sivagami et al. (2024) e pelo relatório End-of-Life da IRENA (2016) sobre o papel relevante da recuperação de metais para salvaguardar a segurança do suprimento industrial de longo prazo.

E olha outra reflexão: O que a pessoa quer com o sistema fotovoltaico? Gerar energia. O produto final é energia elétrica. O módulo fotovoltaico é só um meio pra gerar essa energia. Não importa se é marcar A ou B e não importa a potência desse módulo. Eu estou falando que existe um módulo de 700W hoje. Ele gera... Beleza. Se eu colocar 3 desse reciclado de 200W vai gerar a mesma coisa. E eu compro 3 desse daqui por R\$ 100,00 ou um desse aqui por R\$ 500,00. E o produto final é a mesma quantidade de energia. E é o mesmo produto de energia, entendeu? – Distribuidor 1

Aí tem duas opções, reutilizar o painel para o próprio, para a própria geração de energia, né? Então, painéis que ainda estão aptos a gerar energia, eles podem ser reinstalados, ou reutilizar como mesa, como cerca, como qualquer outro fim. É possível, e é isso, dá para fazer dentro da mesma cidade que a usina está instalada, e aí, quando a gente fala em reciclagem, assim, o sonho seria a gente conseguir ter um container de reciclagem em cada estado, por exemplo.” – Diretora da empresa de Reciclagem

Vamos imaginar um cenário em que eu tenho várias placas numa condição igual a essa mesa que visivelmente você vê que ela não está quebrada então ela tem chance de estar boa e aí eu falo a gente faz um acordo com o cliente vamos fazer um projeto de reuso bacana tal às vezes tem comunidade carente lá que precisa de energia para bombear água, umas coisas assim, uma escola que precisa de energia enfim e para

pegar esses módulos em boas condições e fazer o reuso deles tá para gerar energia, coisa parecida” – Gerente da empresa de Reciclagem

Essa cadeia toda produtiva poderia integrar de uma melhor forma essa economia circular, principalmente relacionada a produtos mesmo, de descarte. – Integrador 2

A recorrência dos códigos de logística reversa e custos operacionais nas falas dos entrevistados expõe o gargalo espacial que inviabiliza a destinação adequada na cadeia comum tradicional. O relato do Diretor de Distribuidora sobre a inviabilidade de coletar pequenos volumes dispersos e o apontamento do Gerente de Reciclagem sobre a pulverização da demanda no campo convergem diretamente com o diagnóstico logístico de Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024), os quais sustentam que longas distâncias de transporte drenam a viabilidade financeira da reciclagem de materiais. Esse cenário empírico valida a crítica de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) de que o frete interestadual atua como uma barreira econômica na ausência de redes regionalizadas, forçando o acúmulo temporário indevido de resíduos nos integradores por falta de alternativas economicamente viáveis.

4.3. Aspectos Operacionais das cadeias abordadas

O Quadro 6 apresenta os aspectos operacionais das cadeias abordadas, quais sejam: destinação das placas descartadas, motivo de defeitos ou de descarte, processo de reciclagem e ambiente regulatório, políticas públicas e desafios de conformidade.

Categoria	Código	Contagem de Citações
Destinação	Descarte	18
	Reuso	14
	Armazenagem	8
	Distribuidor	6
	Reciclagem	5
	Seguradoras	4
	Desconhecida	3
	Geração de energia térmica	2
	desenvolvimento de pesquisa	2
Destinação Total		62
Motivo de defeito	Danos de transporte	9
	Obsolescência tecnológica	7
	Defeito de fabricação	5
	Avarias pós instalação	4
	Danos de instalação	4
	Danos climáticos	2
Motivo de defeito Total		31
Processo de reciclagem	Materiais	38
	tecnologia e gestão	32
	desenvolvimento de pesquisa	24
	Separação	18

	prestadores de serviço	14
	geração de valor	7
	subprodutos das placas	7
	Certificação	2
Processo de reciclagem Total		142
Ambiente Regulatório, Políticas Públicas e Desafios de Conformidade	política pública e legislação	9
	documentação a ser emitida	3
	Custos	1
Ambiente Regulatório, Políticas Públicas e Desafios de Conformidade Total		13
Total Geral		248

Quadro 6 - Aspectos Operacionais das cadeias abordadas

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.1. Destinação

A investigação sobre a gestão de fim de vida útil (*End-of-Life* - EOL) dos módulos fotovoltaicos na região de Uberlândia revelou que as rotas de destinação atualmente praticadas em campo refletem o modelo linear de descarte e a ausência de canais formais e acessíveis de logística reversa. Os dados empíricos demonstram que a principal destinação dada pelos agentes de campo aos equipamentos inservíveis é o descarte, operacionalizado por meio do envio a aterros industriais Classe 1 (resíduos perigosos), pelo descarte informal em ecopontos municipais de recolhimento genérico de eletroeletrônicos ou, em casos mais alarmantes, por descarte inadequado diretamente no ambiente. Essa realidade empírica entra em conflito direto com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que preconiza a responsabilidade compartilhada e impõe a triagem e a reciclagem sistemática desses ativos eletroeletrônicos para evitar a sobrecarga de aterros.

Sob a ótica científica de Sharma et al. (2021) e de Vinayagamoorthi et al. (2024), a disposição de painéis fotovoltaicos em aterros comuns ou em áreas a céu aberto gera um passivo ambiental severo: ensaios de lixiviação simulando condições de descarte provam que a fratura física do vidro protetor (*glass laminate encapsulation*) acelera significativamente a mobilidade de metais pesados, liberando concentrações de chumbo (Pb) de até 9,3 mg/L — patamar significativamente superior aos limites regulatórios e ecotoxicológicos seguros para a preservação de solos e recursos hídricos. Ademais, conforme argumentado por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022), o descarte linear inviabiliza o processo de recuperar e reaproveitar metais nobres, semicondutores e outros materiais de alto valor agregado diretamente a partir de resíduos e produtos descartados no fim de sua vida útil (como os módulos fotovoltaicos e lixo eletrônico) e reintegrá-los ao ciclo produtivo em vez de abandoná-

los em aterros ('mineração urbana'). Esse processo acontece com as matérias-primas críticas e escassas de altíssimo valor de mercado e pureza (como o silício policristalino, o cobre e a prata), resultando em uma perda definitiva de recursos que poderiam reintegrar as cadeias de suprimento circulares locais com menor pegada de carbono.

Uma boa parte do distribuidor até coleta, principalmente quando são as garantias, a aprovação da garantia. Agora, quando isso aí acaba não acontecendo, o distribuidor não coleta, a gente vê que tem um atraso, tem uns que já pedem para descartar aqui na região mesmo, aí a gente deixa acumular e descarta – Integrador 2

A gente participa de uma rede de recicladores de 28 empresas no Brasil todo, tá? E no grupo constantemente surgem perguntas relativas à placa fotovoltaica. E normalmente a solução é a mesma, tira, desmonta, tira o alumínio, tira o cabo e manda a parte de vidro com placas, normalmente para aterro industrial, tá? – Gestor de resíduo eletroeletrônico

Um aterro classe 1 é preparado para receber esse tipo de material. Dentro da placa fotovoltaica temos resíduos perigosos, ok? Então, não é um aterro sanitário e nem um aterro classe 2 que vai receber esse tipo de material. Vai ser um aterro industrial. – Gestor de resíduo eletroeletrônico

A segunda rota de destinação mais reportada em campo foi o reuso, o qual, para fins de precisão conceitual e em alinhamento com a hierarquia de gestão de resíduos fotovoltaicos, deve ser classificado em duas vertentes analíticas distintas:

- **Reuso Funcional Energético (*Second-Life PV*):** compreende a reintrodução de módulos ainda operacionais em novos arranjos de geração elétrica. Esse fluxo reverso é alimentado majoritariamente por processos de desativação antecipada, *retrofit* ou repotenciação (*repowering*) de grandes usinas, onde módulos funcionais, mas tecnologicamente obsoletos (de menor potência unitária), são substituídos por modelos mais modernos e de maior eficiência. Conforme apontado pelo relatório global da Irena (2016) e pelas discussões de Al Zaabi e Ghosh (2024), essa rota de mercado secundário gera elevado retorno socioambiental com mínimo processamento industrial, despontando como uma alternativa de baixo custo para atender demandas energéticas descentralizadas de populações vulneráveis ou comunidades rurais isoladas.
- **Reaproveitamento Estrutural Não Energético (*Downcycling*):** refere-se à destinação física das placas inativas para fins alheios à geração elétrica, como mesas, cercamentos, coberturas rústicas ou mostruários de integradores. Essa aplicação residual de baixo

valor tecnológico encontra paralelo nas rotas de aproveitamento composto documentadas por Kokul e Bhowmik (2021), atuando como um mecanismo prático de contenção para evitar a destinação imediata de resíduos volumosos para aterros industriais.

Contudo, os respondentes emitiram sérios alertas sobre as barreiras técnicas e os riscos de segurança intrínsecos ao mercado secundário de módulos fotovoltaicos. Em perfeita consonância com os achados de Tsanakas et al. (2020) e as diretrizes de confiabilidade de Al Zaabi e Ghosh (2024), módulos que sofreram avarias no vidro temperado ou que apresentam microfissuras internas invisíveis nas células de silício perdem sua rigidez dielétrica e capacidade de isolamento. Sob exposição a intempéries em campo (como chuva ou umidade severa), esses defeitos ocultos provocam fuga de corrente elétrica, sobrecarga nos filamentos de condução remanescentes e geração de pontos quentes (*hotspots*) de temperatura extrema, com risco real de derretimento da caixa de junção e incêndio. Ademais, a viabilidade do reuso funcional esbarra no chamado vácuo de recertificação: a perda automática da garantia de fábrica original e a ausência de normas e testes técnicos padronizados (como ensaios de fuga úmida e caracterização por simulador de *flash test*) geram severa assimetria de informação e desconfiança do consumidor final quanto à confiabilidade operacional e durabilidade dos ativos de segunda mão.

Ele coloca de mostruário, tem integrador que faz mesa, tem muito integrador que me procura. Tem módulo com pequena avaria aí? Eu quero fazer um showroom. Então, coloca na parede, um, dois – Distribuidor 1

Mas o que eu entendo de reciclar é um módulo avariado, um módulo estragado, amassado, não um módulo em perfeito estado. E poderiam surgir empresas que, por exemplo, poderiam recolher ou receber esses módulos lá de Pirapora e vender no mercado. Que para uma residência, para um pequeno comércio, esse módulo atende perfeitamente. – Distribuidor 1

Tem um equipamento aqui que você coloca no sol e através dos cabos você mede um monte de parâmetro, mas assim, tudo bem, se fizer esse teste. mesmo que eu faça um teste elétrico e esteja ok, e eu faço um teste com câmera térmica e tudo mais, de toda forma vai ter que ter o consenso do cliente falando, olha, eu testei as placas vai precisar usar, aí o projeto vai para frente, foi legal mas é muito mais complicado porque a gente não pode pegar o módulo e revender ele porque eu não posso vender o nome do fabricante, por exemplo, é crime, basicamente. Existe toda uma questão de recertificar o módulo para a venda porque ele precisa ter um certificado de segurança. então o

reuso apesar de parecer uma coisa simples, tirei e tá bom. a gente pode botar a funcionar legal, mas tem umas coisas que nós gostaríamos que não fosse tão complicado para fazer o reuso mas tem muita coisa que precisa tomar cuidado, sabe
– Gestor de Recicladora 1

Houve vários relatos também de armazenagem das placas seja nos clientes finais, no distribuidor ou no integrador, por desconhecimento de uma destinação adequada.

Eu tenho ainda bastante placa em Uberaba, no nosso galpão, quanto aqui em Uberlândia, aguardando o descarte do distribuidor e se não der, a gente provavelmente depois de um tempo ainda acumulando vai ter que levar para o ecoponto. Sempre tem um volume bom guardado para liberação. – Integrador 2

A gente até hoje não descartou nenhum módulo, pra te falar a verdade. A gente armazena aqui” – integrador 4

A análise das interações referentes ao código Distribuidor (6 citações) revela que a preferência dos integradores entrevistados por direcionar os módulos danificados aos distribuidores atacadistas vai além da conveniência operacional, caracterizando a ativação prática do princípio de Responsabilidade Estendida do Produtor (EPR). Este princípio, que norteia tanto as regulamentações internacionais da diretiva WEEE quanto o arcabouço da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/2010), atribui aos elos a montante da cadeia de suprimentos (fabricantes, importadores e distribuidores) as obrigações físicas e financeiras pela gestão de fim de vida útil de seus ativos eletroeletrônicos.

Essa forte tendência regional de retorno ao canal atacadista encontra perfeita consonância com os dados empíricos de mercado consolidados pelo relatório nacional da Greener (2024), o qual aponta que 38% dos integradores brasileiros realizam o descarte de equipamentos danificados por meio da devolução direta aos seus respectivos distribuidores ou fabricantes. Sob a ótica operacional das empresas de Uberlândia, esse fluxo reverso é motivado pela necessidade de acionamento de garantias de fabricação ou pela mitigação de prejuízos decorrentes de sinistros e avarias mecânicas ocorridas durante as fases críticas de frete, descarga ou recebimento dos kits fotovoltaicos.

Todavia, a eficácia desse canal — assemelhado aos esquemas de devolução do distribuidor regulamentados em mercados maduros como o Reino Unido — esbarra em um gargalo logístico de coordenação e escala. Na ausência de canais capilarizados de descarte regionalizado, a devolução pulverizada de pequenos volumes de placas avariadas aos

distribuidores acaba por apenas transferir temporariamente a responsabilidade física de armazenamento e a respectiva assimetria de custos do passivo ambiental dentro da cadeia. Diante dessa barreira, consolida-se o argumento de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) e Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024) sobre a necessidade premente de estruturar circuitos curtos descentralizados que permitam o escoamento e processamento desses estoques acumulados diretamente em polos regionais de reciclagem.

A gente a gente sabe que tem o material ali eletrônico que é de descarte e a gente tem que seguir as instruções do distribuidor, que é basicamente retirar os equipamentos danificados que estão ou não sujeitos a garantia e para que eles possam realizar a coleta. Então hoje a gente quando tem um painel com problema ou danificado ou que quebra se a gente quiser, se a gente conseguir a coleta pelo distribuidor a gente faz isso porque eles estão coletando diretamente para alguns outros equipamentos de garantia. Eles levam esses outros equipamentos, mesmo uma placa quebrada, por exemplo. – Integrador 2

Quando é assim, a gente faz uma ressalva na nota, para eles enviarem um novo, aí eu não sei como que é a tratativa entre o transportador e o distribuidor, para identificar quem é o culpado, essa parte eu já não me atentei não. em alguns casos eles recolhem, depende do modelo da transportadora – Integrador 4

A investigação da rota de Reciclagem (5 citações) evidenciou que a viabilização comercial desse canal reverso não ocorre de forma orgânica pelas forças de livre mercado, sendo condicionada a uma complexa equação de viabilidade financeira, incentivos regulatórios e conformidade corporativa. Os dados empíricos indicam que o interesse por esse processo é relevante para grandes usinas de Geração Centralizada (GC), onde o descomissionamento ou processos de repotenciação geram escala suficiente para mitigar os impactos do frete rodoviário de longa distância. Nesses arranjos industriais, a demanda dos grandes players pela reciclagem é motivada não apenas pela mitigação de passivos ambientais, mas pela necessidade de obter o Certificado de Destinação Final (CDF), emitido via sistemas oficiais de manifesto de resíduos, o qual assegura a conformidade legal perante a PNRS e fortalece a legitimidade socioambiental das marcas por meio do marketing verde.

Contudo, a consolidação desse fluxo reverso esbarra em severos obstáculos econômicos e logísticos documentados em campo. Sob a ótica de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022), os custos operacionais da reciclagem superam o valor de mercado dos materiais secundários recuperados, gerando um severo desincentivo financeiro. Esse abismo financeiro é

detalhado pela literatura ao demonstrar que o custo de processamento industrial de um módulo fotovoltaico (estimado entre US\$ 15 e US\$ 45) é dramaticamente superior ao custo de sua destinação linear para aterros (variando de US\$ 1 a US\$ 5). Para equalizar essa balança, as modelagens de Xu, Liu e Mo (2024) e as discussões de Sharma et al. (2021) convergem para a indispensabilidade de subsídios governamentais diretos focados em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para reduzir os custos de tratamento industrial e estimular a atratividade do setor. Ademais, a recorrente queixa sobre a dificuldade de encontrar parceiros aptos a operacionalizar o fluxo reverso reflete uma lacuna de infraestrutura sistêmica: a ausência de fundições metalúrgicas especializadas (*smelters*) no Brasil capazes de tratar quimicamente misturas metálicas complexas força as recicladoras nacionais a exportar subprodutos consolidados para países como o Japão ou a China, transferindo custos e agregando onerosidade logística à cadeia.

Primeiro o fato da demanda ser pulverizada logisticamente fica caro e o nosso modelo de negócio a gente não paga, a gente nem compra o material e nem cobra pelo processamento então o valor que a gente entrega é um certificado de que a empresa está finalizando o ciclo de destinação do material. Esse é o valor que a gente tem para oferecer: de receber o cliente aqui e falar, cara, teu vidro está indo para a indústria – Gestor da Recicladora 1

Um “player” que influencia a destinação das placas é o setor de seguradoras, visto que já existe um mercado de seguro para os sistemas fotovoltaicos. Elas poderiam viabilizar a logística reversa, entretanto, nem sempre recolhem as placas avariadas, deixando o problema para o cliente final.

Geralmente, a seguradora só banca o pagamento. Ela contrata, ela compra novos módulos e envia. Ela não se preocupa com retirar e aí fica a carga do nosso cliente, que é o integrador, dar o destino para esse módulo – Distribuidor 1

Citou-se a possibilidade de destinação das placas avariadas ou em fim de vida útil para geração de energia térmica, o que além de ser um destino correto, finaliza o processo do contaminante presente nas placas.

Então, existe o caminho aí do uso para gerar energia térmica que é o coprocessamento, tá certo? Isso já é feito com alguns resíduos e é uma das destinações mais adequadas possíveis dentro de um processo de destinação adequada, tá? Porque ali vai haver a

queima e destinação final do resíduo contaminante. – Gestor de Resíduo eletroeletrônico

A destinação de módulos fotovoltaicos avariados para o desenvolvimento de pesquisa científica (2 citações) desponta como uma rota estratégica de alto valor agregado na destinação regional, representando a operacionalização prática da cooperação universidade-empresa sob os preceitos da Inovação Aberta. Os achados empíricos revelam que esse fluxo reverso atende a uma demanda latente da academia regional por insumos reais para ensaios experimentais, como exemplificado no relato do Integrador 4 sobre o fornecimento de células danificadas para um professor universitário na região.

Longe de constituir uma destinação puramente passiva ou de descarte, a integração dos centros de pesquisa atua como um vetor de inovação tecnológica e de transição circular em duas frentes fundamentais descritas pelos entrevistados:

- Desenvolvimento de novos compósitos e materiais de construção (downcycling de utilidade social): as percepções empíricas obtidas junto ao Pesquisador da área de materiais evidenciam a condução de ensaios de compressão e tração com resíduos fotovoltaicos triturados e compactados com cimento e resina para o desenvolvimento de tijolos e blocos voltados à construção de habitações populares de baixo custo. Esse processo analítico apoia-se na utilização de softwares de seleção de materiais, como o CES EduPack (baseado na metodologia de índice de mérito de Michael Ashby), para mapear e pontuar famílias de novos produtos viáveis para o mercado regional. Essa aplicação prática valida e dialoga diretamente com as investigações experimentais de Kokul e Bhowmik (2021), os quais comprovaram a viabilidade técnica da utilização de pó de laminado de silício fotovoltaico reciclado como elemento de reforço estrutural em matrizes poliméricas.
- Sinergias acadêmicas para o reprocessamento de frações complexas: Conforme ressaltado pelo Gestor da Recicladora 1, existe uma sinergia de interesses considerável no meio acadêmico para o desenvolvimento de projetos focados especificamente no reprocessamento do vidro temperado moído. Esse esforço científico conjunto é indispensável para mitigar o atual gargalo tecnológico apontado por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) e Ramírez-Cantero et al. (2025), permitindo que a pesquisa acadêmica regional investigue rotas físico-químicas de baixo consumo

energético para enfraquecer a forte adesão da cola de EVA e viabilizar a separação de materiais com alta pureza.

Uma hora eu vou desmanchá-las e às vezes mandar para algum... teve até um rapaz de Uberlândia que tinha pedido algumas células, ele é um professor da universidade, pelo menos a gente está aí em Frutal, não é só questão da logística, eu tenho algumas células aqui já que eu estaria disposto a mandar para ele, mas aí não deu certo a questão do logístico.” – Integrador 4

Por fim, ainda sobre destinação, chamou a atenção o fato de alguns entrevistados simplesmente não saber o que fazer com as placas.

A maior parte das pessoas e empresas não sabem o que fazer com o material. a placa fotovoltaica é algo novo ainda para a logística reversa também, certo? – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

O fenômeno do armazenamento preventivo de módulos avariados nos galpões de integradores locais (como relatado pelos Integradores 2 e 4), motivado pela indefinição de canais oficiais de descarte, reflete uma lacuna de coordenação setorial descrita na literatura. Essa realidade empírica diverge substancialmente do dinamismo regulatório observado na União Europeia por M. S. Chowdhury et al. (2020), onde a diretiva WEEE impõe canais de fluxo reverso maduros e estruturados. No contexto regional estudado, a ausência de infraestrutura local e a falta de conhecimento dos players sobre a existência de recicladores capacitados criam um 'vácuo de destinação', o qual corrobora os alertas de Sharma et al. (2021) sobre os riscos latentes de lixiviação de contaminantes como o chumbo em descartes inadequados ou em aterros comuns de massa.

4.3.2. Motivos de defeito

A caracterização dos modos de falha, mecanismos de degradação e indutores de descomissionamento prematuro dos módulos fotovoltaicos constitui um pilar analítico para dimensionar o fluxo real de resíduos e a consequente viabilidade de sua captação e processamento regional. Afastando-se de termos puramente cotidianos, a taxonomia científica do setor solar divide a interrupção do ciclo de vida útil desses ativos em duas grandes categorias

operacionais de descarte: as perdas por fim de vida útil projetada (End-of-Life) e as perdas por falhas antecipadas ou substituições prematuras (early loss / premature failures).

Essa diferenciação conceitual encontra perfeita correspondência nos modelos probabilísticos globais desenvolvidos pela IRENA e IEA-PVPS (2016), que mapeiam a probabilidade de falha de painéis em campo por meio da distribuição de *Weibull*, subdividindo as perdas prematuras em falhas infantis (*infant failures*, ocorrendo até o quarto ano de campo) e falhas de meia-vida (*mid-life failures*, ocorrendo entre o quinto e o décimo quinto ano de operação útil).

No cenário empírico investigado, as declarações obtidas junto à Diretora da Recicladora 1 revelam que o fluxo de descarte fotovoltaico atualmente gerado no Brasil é composto em sua totalidade por falhas prematuras (*early loss*), uma vez que o mercado nacional é jovem e as primeiras instalações ainda distam de atingir o limite projetado de 25 anos de operação útil. Conforme indicado pela gestão da planta de processamento, estima-se que essa taxa de descarte antecipado represente entre 5% e 7% do volume físico total de módulos em circulação, englobando perdas provocadas por sinistros climáticos, quebras no transporte e descarga, falhas na instalação e defeitos de fabricação. Essa distinção operacional e a predominância absoluta das falhas prematuras no contexto nacional são explicitadas na percepção da própria recicladora parceira:

A gente divide entre descarte antecipado e descarte fim de vida útil. O descarte fim de vida útil, ele é algo que ainda não ocorre no Brasil, talvez vá começar ali daqui a um ano, dois anos, que é o que já tem muito aqui na Europa, mas no Brasil ainda não, e o que a gente recebe é descarte antecipado. – Diretor de Recicladora 1

O motivo de descarte mais citado pelos entrevistados foram aqueles ocasionados na etapa de transporte, especialmente no momento da descarga.

Nós tivemos recentemente cinco placas, por exemplo, que no manuseio, né, do transporte, o pessoal danificou. Eles foram pegar com a empilhadeira, ao invés de pegar por baixo, pegou no meio da placa, furou as placas. Mas, aí, nesse caso, a gente nem recebeu as placas, a transportadora levou de volta para a distribuidora. – Integrador 3

Outro motivo de descarte bastante citado foi a obsolescência tecnológica. Com a evolução tecnológica dos módulos, alguns clientes fazem a repotenciação da usina, trocando módulos antigos por outros mais novos, de maior potência.

Existem, sim, usinas que estão já fazendo, um nome que pode se dar a isso é repotenciação, né? Que é quando a tecnologia do módulo, ela está obsoleta já, numa mesma área útil, numa usina solar, pode gerar 50% a mais de energia, 100% a mais, né? ... o mercado já está começando a ver essa repotenciação muito mais forte porque está evoluindo muito rápido a potência dos módulos então o pessoal que tem módulo de 300 vai querer trocar por um de 600” – Gestor de Recicladora 1

Os defeitos de fabricação também são motivos de defeito citados pelos entrevistados: diminuição na geração, fechamento de curto ou até refugos durante a fabricação.

Ou é porque veio com defeito de fábrica e aí funcionou um tempo e de repente parou. Visualmente, ela apresenta que está em bom estado, mas ela não produz o que deveria produzir. – Integrador 2

Existem também os danos de instalação como falhas de mão de obra, detectados durante a instalação ou algum tempo depois da instalação, bem como os danos após a instalação, durante uma limpeza ou manutenção da usina.

Danos também que acontecem de, durante o período de operação e manutenção, então a usina já foi conectada, e aí ali nos dois primeiros anos é possível ver algumas falhas de mão de obra, né, que é onde aponta os principais defeitos, tanto do painel quanto da instalação, e aí a gente tem também dano de fogo.... então, ah, o MC4 não foi, não deu aquele clique final e aí acabou gerando ponto quente e derreteu o conector, né, então esse tipo de problema que é durante o período de O&M – Diretor da Recicladora 1

Você vê muitas pessoas que vão limpar um telhado que tem placa solar e que pisam em cima, isso aqui aguenta muito peso, você pode pisar em cima e não vai quebrar mas sabe o que vai acontecer? a célula de silício trincou na hora, você nem enxerga, mas ela tem uma microfissura aqui e essa microfissura quando ela acontece ela desequilibra toda a distribuição elétrica. vai começar a sobrecarregar outros filamentos, ao invés de ter tudo isso aqui de filamento, sei lá vai concentrar em algum outro lugar, isso gera comprovadamente, a gente já viu, recebeu um módulo, que gerou um ponto de incêndio, por um problema invisível a olho nú, que é uma célula de silício trincado, uma ou várias e, literalmente, pega fogo no módulo, na parte de trás é que pega fogo – Gestor da recicladora 1

Por fim, foram citados os danos devido a fatores climáticos: chuva de granizo, vendaval

E existem também os sinistros, né? Que o segurador chama de sinistro, mas são eventos meteorológicos que vão danificar a usina inteira, né? Sei lá, um vento muito forte, uma chuva de pedra, de granizo, de coisa parecida, que também são fenômenos que vão causar uma demanda. - Gestor da Recicladora 1

4.3.3. Processo de Reciclagem

As entrevistas também abordaram a temática da reciclagem para placas fotovoltaicas, visando entender o momento atual, sua viabilidade e desafios. Quais os materiais são passíveis de reciclar, quais as tecnologias existentes e por vir, os desafios de gestão, o desenvolvimento de pesquisas, o processo de separação dos componentes das placas, os prestadores de serviço envolvidos, a geração de valor que a reciclagem pode introduzir, os subprodutos das placas e as certificações necessárias e disponibilizadas pelas recicladoras.

Das entrevistas observa-se que os principais materiais recicláveis de uma forma direta das placas são o alumínio e os cabos, pois são mais facilmente separáveis e reinseridos na cadeia, enquanto o restante dos materiais precisa passar por um algum processo de separação mais elaborado.

Eu não conheço empresa que faz a separação, mas acredito que seja possível aqui em Uberlândia fazer a separação e aproveitar pelo menos o alumínio. E se vai aproveitar o alumínio, poderia aproveitar também em questão de cabo, em questão dos condutores ali. Acredito que seja possível. Agora, a parte do vidro, não sei te falar, e a parte também da célula, não sei te falar se seria possível aqui na região. – Integrador 1

A gente participa de uma rede de recicladores de 28 empresas no Brasil todo, tá? E no grupo constantemente surgem perguntas relativas à placa fotovoltaica. E normalmente a solução é a mesma, tira, desmonta, tira o alumínio, tira o cabo e manda a parte de vidro com placas, normalmente para aterro industrial, tá? – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

O primeiro processo que a gente faz, quando o módulo chega aqui, a gente faz a remoção dos conectores, que está aqui embaixo. Então, o conector, se você for fazer uma análise de quais materiais constituem isso aqui, você vai ter polímero tanto na caixa quanto no conector, quanto no cabo, certo? E cobre, material super reciclável,

como eu falei, o cobre tem um revestimento de estanho, mas isso não onera. são materiais facilmente comercializados – Gestor de Recicladora 1

O componente com maior presença em peso nas placas é o vidro, mas como vários componentes estão fortemente aderidos a ele, a separação para aproveitamento é mais difícil, porém, após a trituração existem algumas possibilidades.

80% desse peso é vidro, porque o alumínio é uma liga leve, polímero também, quando a gente conta o peso que tem o silício aqui é muito pouco em comparação com o peso do vidro – Gestor da Recicladora 1

A grande dificuldade é separar o vidro da placa, consegue-se triturar hoje, mas não é 100% essa separação ainda, ok? E quem trabalha com vidro não quer esse vidro com cola, e aí tem todo o processo, tem toda a dificuldade do processo do tratamento desse material, ok? – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Também existem aplicações alternativas para elas. Por exemplo microesferas, ela tem formato esférico e ela é utilizada como elemento de refletância em faixa rodoviária. Então, quando você vê a luz do carro refletindo, são microesferas iguais essas aqui. Exatamente isso aqui que está lá na faixa, que está na placa. Eles colocam isso na tinta para pintar. Então, tudo que você vê que reflete. Faixa rodoviária. É tudo tinta com microesferas. Na verdade, na faixa rodoviária, eles aplicam uma camada de tinta e logo depois já vem o jato de microesfera, que vai jogando microesfera em cima. – Gestor da Recicladora 1

Após a retirada da moldura de alumínio e dos cabos o que fica é o que o mercado chama de um “sanduiche”, composto pelo vidro e aderido a ele os componentes responsáveis pela geração e transmissão de energia, o silício que faz captação, a prata, o chumbo e as camadas de EVA que fazem a proteção mecânica. Esse sanduiche é como se fosse um componente único, pois é muito difícil de fazer a sua separação, então nas empresas de reciclagem ele é triturado em 3 tamanhos para comercialização.

E depois entra o sanduíche, entra na máquina, pois é impossível de destacar com a mão. Então, ele tem que ter todo um processo mecânico. E a saída desse sanduíche é uma mistura metálica, que tem todos os metais. Então, tem o EVA misturado, junto com silício, prata e todos os outros metais menores, menores quantidades que tem. E três tipos de vidro. Quando eu falo tipo, eu falo do grão. Então, é o vidro em pó, o vidro médio, que a gente chama, e o vidro que é o caco, de vidro um pouco maior. Então, a máquina separa nesses três, porque cada um vai para uma cadeia distinta. Então, seriam esses subprodutos que a gente fala. – Diretora da Recicladora 1

O silício é um componente com presença relevante nas placas e com bom valor se num bom nível de pureza, mas no Brasil não se conhece quem tem tecnologia para conseguir fazer essa separação, então boa parte dos subprodutos da reciclagem é exportada para quem consegue fazer este processo.

Extrair disso aqui o silício para devolver o silício numa cadeia de produção do próprio silício, por exemplo. Sei lá, fazer uma célula nova. Atualmente é um grande desafio, não só para nós, mas internacionalmente, falando assim. Então isso não é tratado nacionalmente. Porque no processo de fabricação do silício você precisa ter uma pureza muito elevada e hoje custa muito caro você processar isso aqui e a quantidade de silício que vai sair daqui que vai atingir a pureza necessária não sei se compensa.
– Gestor da Recicladora 1

O componente tóxico nas placas é o chumbo, material presente em pequena quantidade usado como ponto de solda, e que pensando numa cadeia produtiva poderia ser utilizado para baterias ou material de pesca.

Então, o pessoal faz baterias com chumbo. Então, um lugar para ser aproveitado seria na construção de bateria. Agora, tem alguns outros materiais também. Por exemplo, existe chumbo na composição de munições, composição de material de pesca. Poderia ser utilizado. – Integrador 1

Um entrevistado também citou outro item que compõe uma usina fotovoltaica, que é o inversor, mas que acredita ser um problema menor por já ter um fluxo conhecido de reaproveitamento.

A gente mesmo aqui já recebeu, foram 64 inversores de um lote que nunca foi utilizado de uma empresa chinesa que teve que descartar o material dela por questão de qualidade de entrega final, não era tão boa. Então, eles preferiram destruir do que colocar no mercado e ter problema, certo? A gente teve que fazer a destruição desses inversores, nesse sentido, o desmonte, com fotos comprovando que a gente desmontou e deu a destinação dos resíduos. Então, esse é um material muito mais simples de trabalhar para nós que já estamos acostumados a trabalhar com eletrônico, ok? – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Além dos materiais que compõem as placas, o processo de reciclagem também trouxe questões voltadas à tecnologia e à gestão, como custo do processamento, terceirização de

algumas etapas da reciclagem por meio do desenvolvimento de estratégias e a falta de smelters no Brasil que consigam aproveitar o Silício da *black mass* para separação da mistura metálica.

Eu vou te cobrar para te dar uma destinação para ela. E aí, além do serviço em si, de reciclar ou reaproveitar a placa, eles ainda cobram o processo de logística, que é buscar, trazer, é o que você falou aí, tem que esperar acumular uma quantidade para que esse custo logístico se pague, né? Desde o primeiro dia que a gente pegou uma placa e viu que não dava para separar o vidro dela da placa, já ficou mais claro na nossa cabeça que o processo ali teria que ser um pouco mais detalhado, que dali para frente geraria custo. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico.

Para não criar um bloqueio com os clientes, a gente atende toda a usina, para conseguir atender o cliente de ponta a ponta. Mas aí a gente tem parceiros para entregar os outros materiais. – Gestor da Recicladora 1

Os países que estão trabalhando nisso, eles têm smelters, que são as empresas que separam misturas. O Brasil não tem. Então, o Brasil, dentro da cadeia do próprio eletroeletrônico, toda a mistura metálica, ela é exportada para outros países que fazem a separação. – Diretora da Recicladora 1

O que a gente chama de PMM é a mesma coisa, só que em uma escala de dificuldade maior. A gente tenta encontrar a melhor aplicação possível, mas aqui no Brasil a gente não vai ter muitas empresas que vão ter recurso e tecnologia para pegar isso aqui, processar e entregar materiais melhores e mais limpos. Então o que a gente faz é a gente tem parceiros que junto com resíduo eletrônico, esse tipo de outra coisa, vai consolidar um volume maior de material e vai exportar isso para alguma empresa por aí, no Japão, na China, que tenha tecnologia suficiente para pegar isso aqui tudo e extrair o que tem de bom ali. – Gestor da Recicladora 1

As entrevistas também demonstraram a evolução dos processos de reciclagem, a importância da segurança na reciclagem das placas, a variação na granulometria dos subprodutos da reciclagem, a necessidade de uma máquina que possa reaproveitar o sanduiche das placas e se adaptar a variação do tamanho dos painéis.

O processo dele mesmo mudou muito, porque a gente vai conhecendo a Constituição devagar, vai entendendo o que é feito a cada situação que aparece, né? – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

E elas operam 100% autônomas, então a gente tem hoje funcionários que eles ficam movimentando a carga, né, mas quando o módulo entra dentro do container, todo o processo mecânico de separação, de estruturação é feito dentro do container sem risco

de machucar alguém, então fica tudo bem fechado. E aí as saídas do container já são os materiais separados. – Diretor da Recicladora 1

A gente faz esse ajuste para separar os tamanhos, para controlar o tamanho do material que vai sair em cada uma das saídas. A gente não consegue controlar, por exemplo, quanto de material vai ser gerado no processo. Quanto de material vai gerar de 0 a 600 microns, ou de 600 até tanto, porque no processo de separação é algo muito aleatório o que vai acontecendo, vai processando material. No peneiramento, aí a gente separa. – Gestor da Recicladora 1

Depois que a gente tem só esse sanduíche aqui pronto, a gente vai, aí sim entra num container, que é todo o processo a partir da remoção do perfil de alumínio acontece dentro de um container de 40 pés. – Gestor da Recicladora 1

A nossa entrada do container pega o painel mais largo possível. Então, ele atende desde o pequenininho até o maior sem nenhum problema. E ele atende painel quebrado, totalmente quebrado, só um pedaço de painel. Não tem... A gente brinca que ele não tem frescura. Tem muitas máquinas aqui da Europa que tem que estar o painel perfeito para ser colocado na máquina de reciclagem. Se estiver um pouquinho maior, não cabe. Se estiver todo quebrado, não dá. Então, a gente quis não ter esse problema. – Diretor da Recicladora 1

O desenvolvimento de pesquisas para melhorar a reciclagem também foi muito citado, seja para ajudar no desenvolvimento de novos subprodutos, desenvolver alguma tecnologia para separar os componentes a um custo que traga retorno, buscar sinergias de interesse entre o mercado e a academia.

Existe um software que a gente pode criar o índice de mérito, em função desses dados mensuráveis, a gente pontua algumas aplicações em algumas áreas. O que é índice de mérito? O índice de mérito, a partir do momento que você faz um ensaio mecânico, por exemplo, de compressão, você faz um ensaio de tração ou de torção, você vai ter um valor, e a partir desse valor, existe um software que você joga nele e ele cria uma família de possibilidades de produtos para aplicação. é o CES EduPack, é um software desenvolvido pelo professor Ashby, Michael Ashby. Para jogar nesse software Precisa dos dados. Precisa dos dados da propriedade mecânica. Por isso que a gente tem que fazer os ensaios. Pegar esse resíduo, compactar. Se a gente for misturar esse resíduo, por exemplo, vamos pensar, esse resíduo misturado com cimento. A construção de casas de baixo custo, geração de blocos, enfim. Estou fazendo aqui uma hipótese – Pesquisador

O que acontece hoje na Europa, nos Estados Unidos, que está bem mais avançado do que o Brasil, em termos de tecnologia de reciclagem, todos os recicladores estão

tentando descobrir qual é a fórmula mágica de conseguir separar a mistura a um nível que tenha baixo custo para valer a pena para o valor que a recicladora vai estar vendendo. – Diretor de Reciclador 1

No meio acadêmico a possibilidade de ter um outro projeto que fala da reciclagem do vidro é gigantesca então existe essa sinergia entre o nosso interesse de reciclar, o interesse do cliente em destinar o passivo que ele tem, o interesse da indústria de inovar com a utilização de materiais provenientes da reciclagem, tudo isso caminha junto – Gestor da Recicladora 1

Durante as entrevistas houve itens referentes à pesquisa e ao desenvolvimento menos citados, mas também relevantes, como a possibilidade de diminuir a granularidade e aumentar a pureza, a necessidade de o mercado desenhar um produto pensando no final dele, para facilitar a reciclagem ou o seu aproveitamento e o benchmarking com outros mercados mais maduros.

O maior desafio é esse, já desenhar o produto pensando no final dele, não só no uso dele, mas no final dele, certo? As tecnologias novas são esse desafio. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Sobre o processo de reciclagem também foi muito citado a facilidade de separar o alumínio e os cabos e a dificuldade de separar os demais componentes, as etapas do processo de reciclagem, os custos e o fato da placa não ter sido desenvolvida pensando na reciclagem.

A grande maioria hoje trabalha com processo de destinação, normalmente para aterro industrial. Então tira-se o alumínio, tira-se o cobre, digo, cabo, né, que tem o cobre, e o restante normalmente vão para aterros industriais. E a placa fotovoltaica é isso, é um desafio, é vendido como uma solução, sim, maravilhosa. Ela traz benefícios muito bons, mas não se pensou-se no destino final dela. Então a cola do vidro na placa, ela inviabiliza praticamente o processo de reciclagem dela. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

É possível fazer separação, né? Em vias químicas ou térmicas, a maioria das soluções. Ambos processos são super energy intense, né? Com um gasto de energia muito alto e um custo de investimento muito alto e uma eficiência muito baixa – Diretor da Recicladora 1

O produto não foi concebido para reciclagem. a demanda de reciclagem que existe agora é desse material que não foi concebido para ser reciclado. Então, o módulo fotovoltaico, tudo nele foi pensado para ter uma longevidade e eficiência, basicamente, na geração de energia – Gestor da Recicladora 1

A gente pode criar uma peneira, tipo aquelas peneiras de laboratório, tem três, quatro peneiras com diferentes tamanhos de granulometria, só que a gente pode fazer ela com gravitacional, ela movimenta e por densidade ela separa. Por gravidade, você vibra mecanicamente, ela vai separando, porque o silício, o chumbo e a prata, que você falou, são densidades totalmente diferentes – Pesquisador

Os entrevistados também citaram prestadores de serviço. Hoje há falta de interesse na reciclagem pela alta vida útil das placas e há separação dos responsáveis por cada subprocesso da reciclagem (gerenciadores de resíduos, atravessadores, transportadores e siderúrgicas).

Esse mercado não aconteceu ainda no Brasil, mas vai acontecer. E quando acontecer essas empresas que começaram hoje a reciclar pequenas quantidades, que uma pessoa ou outra passa para eles, vai ter oportunidade de reciclar, como exemplo a de Pirapora, um milhão de módulos de uma vez. – Distribuidor 1

É algo feito para durar, entendeu? O módulo fotovoltaico é feito para durar. Você compra um celular de 15 mil reais, a garantia de 1 ano. Você vai comprar um módulo fotovoltaico de 450 reais, eu vou te falar, é garantia de 25 anos. – Distribuidor 1

Quem vai fazer esse processo é a siderúrgica, ok? Só que a siderúrgica, para receber esse material, ela vai pedir um volume muito alto. Normalmente toneladas, em alguns casos, de 20 toneladas acima. Então, a gente trabalha com uma empresa intermediária que faz volume de material para encaminhar para a siderúrgica. Então ela não desmonta, ela só adquire metais de diversas empresas, seja ela recicladora de eletrônico como a nossa, ou seja de sobras de indústria e assim por diante, faz o volume da siderúrgica e vende esse material para a siderúrgica. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Porque quando a gente fala de um produto que tem a vida útil esperada para daqui a 30 anos ninguém vai levar em consideração poxa, daqui a 30 anos eu quero reciclar os meus painéis que eu tenho aqui é um problema tão longe – Gestor da Recicladora 1

No momento em que chegar ao ponto de falar, cara, eu vou precisar vender mesmo que seja para fazer tijolo, a gente vende. o downcycling é meio que a última saída que nem você falou. o fato é que a demanda cresce, sim, mas a mesma proporção que cresce a gente tem mais parceiros que tem aplicações diversas. – Gestor da Recicladora 1

Citou-se também subprodutos das placas: seus clientes, a necessidade de exportação de alguns desses resíduos e até a presença de um item contaminante, o chumbo.

Você está num caminho que é excelente, porque você pegou um outro tipo de resíduo que é vendido como ecologicamente adequado, sustentável, mas que na produção dele não se preocupou tanto com a destinação, a ponto de recentemente descobrirem que tem um contaminante que pode causar lixiviações nas fazendas fotovoltaicas. – Distribuidor 1

Então, é fundição de alumínio, ou terceiros que pegam alumínio para vender para a fundição. E o vidro é grandes empresas de vidro, também do Brasil. E aí, cabo também entra para a fundição, e a mistura metálica entra para o mesmo fluxo do eletroeletrônico. – Diretor da Recicladora 1

É claro que a gente tem iniciativas junto com empresas para tentar beneficiar, separar isso aqui da melhor forma possível, mas via de regra isso aqui a gente vende para empresas que vão exportar isso. no Brasil ninguém consegue fazer esse processo de separação. – Gestor da Recicladora 1

A recicladora citou várias vezes a necessidade de gerar valor para o resíduo das placas, busca-se então aumentar a pureza dos subprodutos, buscar o destino de maior valor agregado ou que possa agregar mais valor ao subproduto e o papel da recicladora maximizando valor do resíduo ou certificando que foi dada destinação correta ao mesmo.

A gente sempre busca fazer o que é conhecido como upcycling. O upcycling é justamente você tentar encontrar o destino para o material que tenha o maior valor agregado possível. E o downcycling é aquilo que tem o menor valor agregado possível.” – Gestor da Recicladora 1

Continuar a separação. Vamos pensar assim, apesar do material ter saído da nossa mão não 100% separado, ele vai ser separado, porque o nosso objetivo é maximizar o valor só vai me pagar bem aquela pessoa que tem recurso para fazer isso valer mais ainda.” – Gestor da Recicladora 1

Maximizar o valor e encontrar uma aplicação que seja o mais sustentável possível, então é essa é mais uma etapa do nosso desafio de sempre estar em contato com vamos pensar assim, iniciativas de inovação, seja ela privada ou o que for” – Gestor da Recicladora 1

E a pessoa jurídica a gente recebe propiciando descarte com certificação. Então, a empresa nos procura, emite o manifesto de transporte de resíduo, a gente recebe essa mercadoria, faz o processamento e certifica que a empresa descartou isso de maneira adequada.” – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

As dificuldades operacionais apontadas pelas recicladoras quanto à separação dos componentes — com destaque para a forte adesão da cola de EVA que une o vidro temperado

às células de silício — encontram perfeita consonância na literatura técnica. Esse gargalo industrial reflete a tese de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) e de Ramírez-Cantero et al. (2025) de que os módulos fotovoltaicos em fim de vida útil (EOL) atualmente descartados não foram ecologicamente projetados (*design for recycling*) para sofrer descaracterização facilitada, priorizando-se historicamente apenas a longevidade e a eficiência energética em detrimento da circularidade pós-uso. Ademais, as propostas do pesquisador universitário para a trituração e compactação mecânica do resíduo misto voltado ao desenvolvimento de compósitos ou materiais de construção civil de baixo valor agregado caracterizam processos clássicos de downcycling, que convergem com as rotas de força física defendidas por Nevala et al. (2019) e Li et al. (2023) como alternativas de menor intensidade energética frente às onerosas rotas térmicas e químicas puras.

4.3.4. Ambiente Regulatório, Políticas Públicas e Desafios de Conformidade

As entrevistas também mostraram a relevância da regulamentação no reprocessamento do resíduo fotovoltaico, destacando a necessidade de uma política pública e legislação clara, a documentação a ser emitida pelos recicladores e os custos de todo esse processo. Sobre política pública destacou-se a relevância de maiores incentivos a reciclagem, a falta de regulamentação e clareza na legislação.

Você ou regulamenta e fiscaliza de uma forma efetiva, e isso aí vai ser repassado, obviamente, ao consumidor final, porque as empresas vão ter um custo mais caro, ou incentiva remunerando no próprio produto, que eu acho que seria o mais viável mesmo. – Integrador 2

Se você perguntasse se a gente tem interesse em adquirir esse equipamento, no momento, no momento, não. A gente precisaria de uma demanda bem específica para a gente adquirir essa máquina tá, e principalmente como a legislação brasileira vai entender esse resíduo de maneira bem mais clara. Hoje ainda gera muita dúvida na gente, a classificação disso, como vai evoluir, se vai ser um resíduo classe 1, como eles vão tratar isso. - Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

Então, seria acoplar, no nosso modelo de negócio hoje, algo que a gente precisa de um investimento maior, e o mercado, enfim. Talvez venha a pergunta, mas não tem legislação nenhuma, não tem apoio nenhum, tem tributação em venda de produto reciclado, enfim, não tem nenhum apoio para estimular essa, essa fase 2 – Diretor de Recicladora 1

Em termos de documentação a ser emitida, mostrou-se um aspecto sério e complexo, com várias etapas.

Então, uma vez que se olhou toda a logística, fez o material chegar aqui, primeiro, a gente pesa tudo, a gente precisa emitir o NTR, toda a documentação, para obedecer a política nacional dos resíduos sólidos. Então, existe manifesto de transporte de resíduos que precisa ser emitido na origem. E aí, quando chega aqui, a gente declara o recebimento desse material, e depois que a gente processa, a gente emite o CDF, que é o Certificado de Destinação Final, que é emitido lá pelo SIGURD, dependendo do estado, SIGURD, SIGIR, que são os órgãos que regulamentam a política nacional dos resíduos sólidos. Basicamente, quando a gente emite um CDF, esse é o documento que aprova legalmente, que o cliente deu a destinação certa, isso vai, não sei se é a palavra certa, mas vai proteger o cliente, não, está aqui, eu mandei para a empresa que faz a destinação, a reciclagem, e a gente está de acordo com as políticas nacionais, as nossas certificações que nós temos, garante isso. – Gestor da Recicladora 1

Os custos de operar um resíduo perigoso são maiores daqueles para operar outros resíduos.

Então, o custo de você transportar um resíduo perigoso ele é maior do que o custo para se transportar um resíduo que não é perigoso. Tudo isso vai impactar em custo financeiro. – Gestor de Resíduo Eletroeletrônico

A incerteza regulatória relatada pelos entrevistados na região de Uberlândia — caracterizada pela ausência de legislação federal específica para resíduos solares, pela dependência genérica das diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e pela lenta tramitação do Projeto de Lei nº 3.784/2023 — ilustra de maneira fidedigna o vácuo normativo que ainda acomete diversos países em desenvolvimento. Os depoimentos dos gestores sobre os elevados custos operacionais decorrentes do manuseio de um resíduo classificado como perigoso (Classe 1) e os desincentivos fiscais provocados pela bitributação sobre materiais reprocessados encontram respaldo analítico direto na proposição teórica de Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024), os quais argumentam que o desenvolvimento de circuitos curtos e produtos circulares requer uma revisão profunda do arcabouço de incentivos fiscais e de conformidade legal para mitigar déficits operacionais. Para equalizar essa balança de custos, as simulações matemáticas e de teoria dos jogos conduzidas por Xu, Liu e Mo (2024) comprovam que a injeção de subsídios governamentais focados em Pesquisa e

Desenvolvimento (P&D) de reciclagem atua como um catalisador eficiente: ela eleva os preços pagos na coleta, estimula o esforço de inovação do fabricante/reciclador e engaja ativamente o proprietário da usina no descarte adequado, gerando benefícios financeiros sistêmicos para todos os elos do ecossistema. No entanto, em consonância com as modelagens dinâmicas de longo prazo desses autores, os formuladores de políticas públicas e agências reguladoras brasileiras devem ser extremamente cautelosos na calibração da velocidade de reajuste e concessão desses incentivos; parâmetros excessivamente agressivos ou mal dimensionados correm o risco de provocar fenômenos de bifurcação e caos no mercado, desestabilizando a viabilidade financeira das operações regionais e reduzindo o lucro dos agentes envolvidos no fluxo reverso.

4.4. Análise de Impactos Sistêmicos e Integração da Cadeia Reversa

Durante as entrevistas puderam-se avaliar os impactos nas cadeias curtas e comuns dos comentários feitos pelos entrevistados. O principal impacto encontrado foi a dificuldade em viabilizar a reciclagem ou a logística reversa de pequenas usinas por meio da cadeia comum para dar uma destinação adequada às placas fotovoltaicas retiradas das usinas, seja para devolver aos distribuidores, seja para enviar às recicladoras. Isso se deve a pequenos volumes descentralizados através de inúmeras usinas de pequeno porte espalhadas pelo país e distantes das poucas recicladoras existentes, gerando custos operacionais não previstos ou inviáveis para uma logística reversa eficiente, o que acaba por inviabilizar um processo completo, que pudesse atender todas as instalações. Quer dizer que há uma precificação incorreta na venda das usinas, que não considera os custos da logística para descarte.

Os custos desta logística englobam não apenas o transporte até um ponto de aproveitamento ou descarte adequado, mas também a armazenagem em intermediários para viabilizar o frete, a mão de obra para retiradas das placas dos sistemas, a falta de padrão no tamanho e nas condições dos módulos e até mesmo a tentativa de organizar essas coletas distribuídas de forma compartilhada. A distância das usinas até os recicladores atuais também tem impacto no custo, quanto mais longe, mais caro o processo e menos os clientes irão investir nele.

O tamanho das placas, que não são pequenas, dificulta viabilizar pontos de entrega pela necessidade de espaço para recebimento. Assim, a complexidade da operação reversa e seus custos acaba gerando valores superiores a aqueles obtidos pelos materiais possivelmente reprocessados das placas, inviabilizando uma cadeia comum eficiente e desestimulando a

logística reversa. Ou seja, o módulo retirado das usinas e que não mais gera energia, não tem valor, as próprias recicladoras não pagam por ele, muito pelo contrário, elas cobram para receber ou coletar as placas, quer dizer que o cliente tem um custo para se desfazer das placas, sendo o principal componente deste custo a logística.

O frete inviabiliza essa questão de enviar para um lado ou para o outro a quantidade pequena de módulos. Para que eu, como distribuidor, vou querer receber módulo que está lá no Piauí, da Bahia? – Distribuidor 1

Um dos desafios é a demanda pulverizada. imagina uma demanda pulverizada que ela vai falar assim eu tenho 30 pontos para coletar 60 placas em cada ponto espalhadas pelo estado do Paraná. imagina toda essa logística para fazer tudo isso convergir e vir para cá. O custo disso, sendo que a pessoa, que normalmente é um CPF, ela só quer tirar essa meia dúzia de placas daqui da minha casa, está ocupando meu espaço” – Gestor da Recicladora 1

Percebe-se das entrevistas também uma falta de conhecimento pelos players da cadeia fotovoltaica da existência de recicladores capacitados, seja pela pequena quantidade deles atualmente existentes ou pela falta de divulgação de sua existência e deste processo.

A falta de mais recicladores ou transportadores atuantes na logística reversa da cadeia pode ser explicada pelo volume ainda baixo de placas em fim de vida útil (EOL) ou de descarte antecipado, pela necessidade de se atender a exigências legais para tratamento de resíduos perigosos e os custos envolvidos nesse processo. Inclusive a variação no preço de alguns dos subprodutos da reciclagem, que fazem as recicladoras necessitarem de espaço e fôlego financeiro para armazenar estes subprodutos por algum tempo, até que o preço seja considerado satisfatório. O papel maior das recicladoras para os clientes seria emitir certificados de que o descarte das placas está sendo feito de forma adequada, mas devido à distância das usinas até os poucos recicladores capacitados, elas acabam se envolvendo em uma etapa mais custosa, que é a operacionalização da logística reversa.

Os custos da logística reversa e a falta de conhecimento da existência de recicladoras levam à indefinição de um caminho viável para as placas em fim de vida útil, gerando o acúmulo destas nos pontos de instalação ou ao seu descarte inadequado e falta de tratativa para o resíduo, o que preocupa não apenas pelo volume, mas pela presença de contaminantes em sua

composição. Inclusive foi citada, em uma das entrevistas, a importância de fiscalização de cooperativas de recicladores para evitar o descarte indevido.

Toda essa complexidade operacional e indefinição de um caminho para as placas de descarte antecipado ou em EOL parece se originar dos pequenos volumes atualmente de placas nesta situação, não sendo ainda uma preocupação relevante. Entretanto, foi relatado que estes volumes são crescentes e devem experimentar um “boom” quando as primeiras instalações completarem 25 anos, o que deve acontecer por volta de 2040.

Foi relatado também que para grandes empresas, reciclar é uma obrigação e também um interesse dos grandes players da cadeia fotovoltaica possuir uma destinação adequada devido às políticas sustentáveis e às cobranças legais.

Hoje que está pegando mais esses assuntos ambientais e as empresas estão querendo ir atrás e ver se elas se adequam a isso para poder ganhar mais visibilidade. Isso é bom para a imagem da empresa, vou comprar dele o distribuidor vou comprar de tal fornecedor fabricante de módulo porque ele tem. Estava até hoje na reunião com o fabricante que a gente está num projeto disso, de direto com o fabricante ele também já conseguir ofertar para o distribuidor dele a forma de reciclar esse material, não é só ele vender mas pensar em toda a vida útil do material, então é todo um ciclo, não é só pensar na produção e venda, não, tem que pensar no ao longo – Gestor da recicladora

1

Outro impacto comentado é o reaproveitamento dos módulos retirados de grandes usinas que passam por processo de repotenciação, substituição de módulos antigos por outros mais novos que geram mais energia. Os módulos antigos poderiam seguir gerando energia, sendo destinados a outras localidades, mas mesmo neste caso, é necessário investimento para a logística. De qualquer forma, a repotenciação de grandes usinas solares, onde há uma grande quantidade de módulos num único lugar, diminui o impacto do custo da logística no processo, tornando-o viável, seja movimentando a recicladora até a usina ou lotando caminhões para o envio até o reciclador. Apesar de aparentemente ser viável a reciclagem de grandes usinas centralizadas, a poluição gerada pelo transporte, seja das placas, seja da recicladora continuará presente.

A possibilidade de reciclar as placas para reinseri-las na cadeia foi pouco explorada pelos entrevistados, mas foi citado a relevância de identificar este tipo de placas, caso ocorra este processo.

Ainda neste tópico, como as usinas solares têm outros componentes além das placas, no caso de reciclagem, a recicladora acaba fazendo a gestão de todo resíduo da usina, para isso eles tem parceiras com outras empresas que aproveitam os demais componentes, como os inversores.

Desta forma, acredita-se que as cadeias curtas, possibilitando o reaproveitamento dos resíduos mais próximo do local onde as usinas estão instaladas, poderiam beneficiar o ecossistema fotovoltaico não apenas reduzindo o impacto ambiental devido ao descarte inadequado, mas diminuindo também os custos da logística reversa, desenvolvendo a economia regional e o marketing verde, o que alimenta a economia circular e pode realmente fazer desta uma cadeia sustentável. Mais do que isso, não se trata de uma possibilidade, mas de uma necessidade para viabilizar algum aproveitamento dos módulos danificados em substituição a uma logística reversa longa e custosa.

No sentido de pensar na viabilidade de uma cadeia curta, a questão colocada aos entrevistados foi a possibilidade de reaproveitamento das placas em fim de vida útil ou de descarte antecipado e como resposta encontramos algumas opções como:

- Reaproveitamento das placas inteiras, como na utilização para show room, telhados, coberturas, cercas, muros ou mesas;
- Desenvolvimento de processos de reciclagem que consigam separar alguns componentes das placas para que sejam aproveitáveis, como vidro, alumínio e cabos, sendo que os dois últimos são mais facilmente retirados das placas, enquanto o vidro está fortemente aderido a outros componentes e precisaria de algum investimento para melhorar sua pureza. Neste quesito também foi comentado sobre o chumbo, material tóxico, mas utilizado na confecção de baterias, munições e material de pesca e ainda o próprio silício, que poderia ser reinserido na cadeia fotovoltaica.
- Soluções que necessitariam alguma adaptação das placas, como pequenos coletores de lixo seco ou carregadores para bateria de celular ou automóvel.

Normalmente pequeno porte, não de grande porte. Então imagina um coletor de um por um, um metro por um metro, um metro cúbico, tamanho de um big bag ali, que possa ser colocado resíduo eletrônico dentro dele, eu digo eletrônico porque é um resíduo seco, resíduo seco em geral, porque se for úmido já é questão de lixiviação, água, contaminação e assim por diante. É um pouco mais crítico. - Gestor De Resíduo Eletroeletrônico

- Reutilização de placas em boas condições e ainda com capacidade de geração que foram substituídas em processos de repotenciação de usinas.

Vamos imaginar um cenário em que eu tenho várias placas numa condição igual a essa mesa que visivelmente você vê que ela não está quebrada então ela tem chance de estar boa e aí eu falo a gente faz um acordo com o cliente vamos fazer um projeto de reuso bacana tal às vezes tem comunidade carente lá que precisa de energia para bombear água, umas coisas assim, uma escola que precisa de energia enfim e para pegar esses módulos em boas condições e fazer o reuso deles tá para gerar energia, coisa parecida” - Gestor de Recicladora 1

- Abertura de recicladoras regionais, mais próximas aos locais onde as usinas estão instaladas

- Processos de incineração para destinação final do contaminante, viabilizando o uso na composição de outro produto

Viabilizando uma cadeia curta, todas estas possibilidades ajudariam a evitar o descarte inadequado das placas, trazendo possibilidades para seu reaproveitamento e desta forma tornando a cadeia produtiva das placas fotovoltaicas mais integrada e sustentável. A instalação de recicladores junto a grandes usinas centralizadas parece ser uma solução já viável em casos de *retrofit*, fazendo-se o processamento dos resíduos ou das placas próximo da usina e conseguindo assim uma destinação adequada de seus resíduos. Entretanto, para a reciclagem das usinas de geração descentralizada, devido ao baixo volume atual e a complexidade da operação, pode fazer sentido algum incentivo público.

Destacou-se ser importante também divulgar a possibilidade de reciclagem e dos players da cadeia para que este processo seja efetivo, visto que atualmente, muitos participantes da cadeia não sabem da existência do processo.

As placas também possuem materiais nobres como a prata, que podem trazer o interesse no seu aproveitamento e outros tóxicos, que precisam de cuidados especiais para o manuseio, como o chumbo, havendo assim interesse econômico e ambiental na busca de alternativas para a destinação das placas retiradas das usinas fotovoltaicas.

Os componentes das placas são em sua maioria materiais nobres, ou seja, normalmente com interesse em reaproveitamento, desde que devidamente separados.

Considerando que existem usinas fotovoltaicas de diferentes tamanhos, com diferentes prazos de esgotamento da sua vida útil espalhadas por todos o país, a instalação de recicladores locais, fazendo o processamento dos resíduos mais próximo de onde as usinas estão instaladas foi apontada como uma possibilidade, tendo em vista as dimensões continentais brasileiras que elevam os custos de grandes deslocamentos. Uma das recicladoras entrevistadas inclusive opera com um container móvel que pode ser deslocado até regiões que possuem placas para processar, mas que atualmente só viabiliza esta movimentação para grandes usinas centralizadas, não apenas devido aos custos de locomoção e ao fato de no Brasil ainda não haver uma demanda tão alta, mas a necessidade de desenvolver clientes regionais para seus subprodutos.

Ou seja, não adianta reproprocessar as placas, é necessário desenvolver clientes para seus subprodutos, senão, a economia no frete das placas é perdida com o frete dos subprodutos. Assim, modelos poderiam ser testados em regiões com maior número de placas instaladas há mais tempo ou criar cadeias organizadas com estoques regionais, onde se espera que num futuro existam maiores volumes de placas em EOL ou de descarte antecipado, para que desde já também se desenvolvam clientes para os resíduos das placas.

Hoje ela está em Valinhos e está em Montes Claros, por uma questão de que o Brasil ainda não tem uma demanda alta ou não tem cadeias organizadas que estoquem o suficiente de material para a máquina poder ir e fazer o processamento. Então é mais questão de a gente conseguir organizar subcadeias, vamos dizer assim, para estoque, para que a máquina possa ir atender municípios, atender, enfim. - Diretor de Recicladora 1

Eu acho que um cenário possível é um projeto muito bem elaborado e falar, não, realmente eu quero repotenciar tudo isso, preciso descaracterizar uma usina inteira e aí sim vai ter um trabalho para, beleza, eu preciso encontrar fundições ali perto, comprador para isso, preciso encontrar uma empresa, uma indústria de vidro, preciso encontrar alguém que faça reciclagem de eletroeletrônico - Gestor de Recicladora 1

Atualmente o volume de placas em EOL ou de avarias ainda é pequeno, desestimulando investimentos em recicladoras regionais ou no destino das placas, mas o grande volume futuro que deve vir principalmente dos processos de repotenciação, dos quais serão retiradas placas ainda em condições de gerar energia, e a preocupação crescente de empresas em processos sustentáveis faz pensar que o seu reaproveitamento é uma discussão importante e algum incentivo público pode ser necessário no início.

E olha outra reflexão: O que a pessoa quer com o sistema fotovoltaico? Gerar energia. O produto final é energia elétrica. O módulo fotovoltaico é só um meio pra gerar essa energia. Não importa se é marcar A ou B e não importa a potência desse módulo. Eu estou falando que existe um módulo de 700W hoje. Ele gera... Beleza. Se eu colocar 3 desse reciclado de 200W vai gerar a mesma coisa. E eu compro 3 desse daqui por R\$ 100,00 ou um desse aqui por R\$ 500,00. E o produto final é a mesma quantidade de energia. E é o mesmo produto de energia, entendeu? - Distribuidor 1

De qualquer forma se faz necessário um estímulo a pesquisa para desenvolvimento regional de produtos ou processos de reciclagem para aproveitamento das placas retiradas das usinas fotovoltaicas, bem como benchmarking com mercados mais desenvolvidos e maduros neste processo. As pesquisas não devem se limitar ao reaproveitamento das placas, mas atuar também em sua concepção, propiciando placas que sejam mais facilmente reaproveitadas ao final de sua vida útil, como um vidro mais facilmente separável dos componentes que atualmente estão a ele aderidos. Será necessário o desenvolvimento de soluções que tenham viabilidade financeira e ambiental para os investidores e sociedade.

Provavelmente deverão existir soluções diferentes para grandes usinas de geração centralizada e para a geração distribuída. Atentando-se para esta última a importância da avaliação da variação no tempo de instalação de cada usina. Foi destacado que existem inclusive grupos de pessoas da sociedade para discussão da reciclagem e sustentabilidade. Assim, um rastreamento das regiões com maior número de placas instaladas, o tipo de painel utilizado e o seu tempo de instalação para tentar prever quando os painéis serão trocados, seja por processos de repotenciação ou de descarte antecipado pode sugerir por onde as pesquisas nesse sentido devam ser iniciadas, bem como indicar a localização de futuras recicladoras.

É um desafio, eu acho que, inegavelmente, deve existir alguma oportunidade nesse sentido. Agora é pesquisa mesmo, entender o que pode ser feito, levantar todas as suas possibilidades e traçar um estudo de viabilidade, seja econômico, ambiental, de tudo.
– Integrador 2

Os custos de instalação de recicladoras regionais também podem variar de acordo com o custo do terreno, da mão de obra e dos volumes processados, então, um levantamento de parâmetros que ajudem a definir o momento de viabilidade para instalação de recicladores regionais também se torna importante.

Desta forma, foram sintetizados os achados das entrevistas numa matriz ação versus impacto para a cadeia curta, mostrando quais efeitos cada ação na cadeia curta pode gerar é demonstrada a seguir:

Ações da cadeia curta	Redução de custos logísticos	Viabilidade da logística reversa	Redução do descarte inadequado	Viabilidade no Reaprov. de resíduos	Desenv. regional	Economia circular
Regionalização da reciclagem	X	X	X	X	X	X
Organização logística regional	X	X			X	
Reaproveitamento de módulos e materiais		X	X	X	X	X
Desenvolvimento de mercados regionais	X	X	X	X	X	X
Coordenação e inovação da cadeia		X	X	X	X	X

Quadro 7 - Matriz Ação x Impacto para Cadeia Curta

Fonte: Elaborado pelo autor

As dimensões estratégicas delineadas no Quadro 7 não se limitam a meras constatações factuais de campo, mas constituem as diretrizes operacionais para a estruturação de um ecossistema regionalizado de economia circular. A fundamentação teórica de cada uma dessas frentes de ação e a sua respectiva articulação com a literatura de Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) são detalhadas a seguir:

- **Regionalização da Reciclagem:** Caracteriza-se pelo estabelecimento de recicladoras regionais fixas ou pela operacionalização de contêineres móveis de processamento descentralizado, além de incineradoras regionais. Sob a ótica de Sanchez et al. (2020) e Pilla Jr., Pimenta e De Oliveira (2024), a descentralização física das plantas de tratamento para pontos próximos aos centros geradores de resíduos é um requisito crítico para neutralizar o impacto ambiental do frete rodoviário de longa distância. A interiorização da tecnologia reprime a pegada de carbono da cadeia reversa e viabiliza financeiramente a captação de ativos em Geração Distribuída (GD).
- **Organização Logística Regional:** Envolve a consolidação de volumes e a estruturação de subcadeias por meio de estoques regionais e pontos de coleta compartilhada (milk run). Conforme defendido por Paciarotti e Torregiani (2021) e Aguiar, Delgrossi e Thomé (2018), o maior desafio das redes reversas de capilaridade pulverizada reside na ineficiência de transporte de pequenas frações. A organização cooperativa regional e o

agenciamento de hubs locais de consolidação restabelecem a economia de escala, reduzindo significativamente os custos de armazenagem e movimentação.

- **Reaproveitamento de Módulos e Materiais:** Compreende a aplicação da hierarquia de circularidade por meio do reuso funcional de módulos operacionais obsoletos (second-life PV), do reaproveitamento físico-estrutural de placas inativas (downcycling) e da separação mecânica avançada de metais críticos. Essa diversificação de rotas de destinação encontra amparo nas premissas de Cosenza, Andrade e Assunção (2020) e Al Zaabi e Ghosh (2024) sobre a desaceleração de ciclos de materiais. O prolongamento da vida útil dos painéis por meio de mercados secundários locais e projetos sociais de eletrificação rural retém o valor de uso do equipamento no nível regional, mitigando o desperdício sistêmico de recursos.
- **Desenvolvimento de Mercados Regionais:** Concentra-se na atração e consolidação de clientes locais (como fundições de alumínio e cobre ou indústrias regionais de vidro) aptos a absorver os subprodutos recuperados no processamento. Essa ação valida empiricamente as discussões de Duarte e Thomé (2015) sobre a relevância do desenvolvimento socioeconômico regional como fator de atratividade e sustentabilidade de cadeias locais. Conforme alertam Pilla Jr. et al. (2024), a viabilidade financeira da cadeia curta depende de manter os fluxos de saída de materiais dentro do próprio território, sob o risco de que o frete de longa distância dos resíduos reciclados anule as vantagens logísticas obtidas na captação inicial das placas.
- **Coordenação e Inovação da Cadeia:** Foca na integração de informações, no fomento à pesquisa aplicada universidade-empresa, na estruturação de incentivos governamentais, no mapeamento das usinas atualmente existente, no benchmarking com mercados desenvolvidos e na aplicação de diretrizes de design circular. Esse pilar analítico apoia-se nas discussões de Morshed Chowdhury et al. (2024) e Burgess e Sunmola (2021) sobre o papel das plataformas digitais para gerar transparência, rastreabilidade e compartilhamento equitativo de custos e responsabilidades ao longo do ciclo de vida do produto. Ademais, converge com o diagnóstico de El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) de que a inovação tecnológica deve retroalimentar o ecossistema, induzindo os fabricantes a conceber módulos de fácil desmontagem e incentivando os reguladores regionais a formular políticas fiscais que equalizem a atratividade do material reciclado frente ao material virgem.

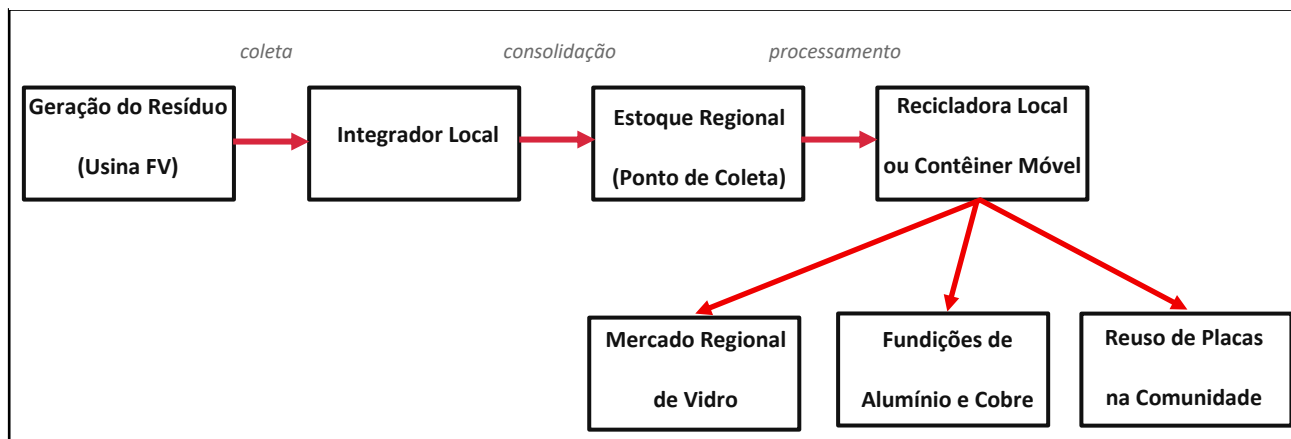
Verifica-se assim que a utilização de cadeias curtas traz impactos sistêmicos, tornando a cadeia mais sustentável, à medida que diminui os seus impactos ambientais, trazendo uma viabilidade econômica para destinação de placas EOL ou avariadas e estruturando ecossistemas regionais. Desta forma possibilita também o aproveitamento do marketing verde para os players da cadeia, resolvendo a preocupação de grandes indústrias e da sociedade com a destinação sustentável dos seus resíduos.

Das entrevistas também se verifica uma clara relação entre a cadeia comum e a cadeia curta, da qual depreende-se que a cadeia curta pode vir a resolver os problemas da cadeia comum, conforme o Quadro 8 a seguir:

Problemas estruturais da cadeia comum	Consequências observadas	Potencial melhoria com uso da cadeia curta	O que isso resolve na prática
Centralização da reciclagem e longas distâncias logísticas	Alto custo operacional e inviabilidade econômica da logística reversa e impacto ambiental	Descentralização: Reciclagem regional e processamento próximo às usinas	Elimina a necessidade de fretes longos, viabilizando o custo da operação
pequenos volumes descentralizados e baixa escala operacional	Dificuldade de consolidação logística e acúmulo de resíduos	Estoques regionais e organização de subcadeias	Diminui os fretes longos, viabilizando coletas e uso do <i>milk run</i>
Baixa atratividade econômica do resíduo fotovoltaico	Desestímulo à destinação adequada	Reaproveitamento local e desenvolvimento de mercados regionais com clientes locais para os subprodutos	O frete do subproduto é minimizado, garantindo que o valor financeiro fique retido na região
Falta de articulação e conhecimento da cadeia	Descarte inadequado e baixa adesão à logística reversa	Integração: Divulgação, coordenação da cadeia e incentivos	Conecta geradores de resíduos aos recicladores capacitados próximos, fomentando o mercado
Crescimento futuro do volume de módulos em EOL	Risco de sobrecarga da cadeia reversa	Planejamento regional, expansão gradual da infraestrutura e reuso de placas funcionais	Aumenta o ciclo de vida do produto na própria região geradora do resíduo, evitando o envio para aterros
Descarte inadequado de material contaminante	Contaminação do Solo	Desenvolvimento de técnicas para melhor separação de componentes das placas e design reciclável	Elimina o descarte incorreto das placas com contaminante

Quadro 8 - Matriz de Transição: Gargalos da Cadeia Comum vs. Soluções na Cadeia Curta

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 - Modelo Conceitual do Fluxo da Cadeia Curta Fotovoltaica

Fonte: Elaborado pelo autor

Para consolidar a transição entre o cenário logístico atual e as oportunidades levantadas em campo, o modelo conceitual ilustrado na Figura 5 apresenta o fluxo operacional da Cadeia Curta de Suprimentos aplicada aos resíduos fotovoltaicos. Ao contrário do modelo centralizado (que exige fretes de longa distância direto do integrador para uma recicladora distante), o modelo conceitual de cadeia curta baseia-se na criação de hubs regionais de consolidação e no processamento descentralizado (via instalações locais ou maquinários móveis). O diferencial estratégico desse fluxo é a criação de conexões de saída com mercados clientes regionais (fundições locais, indústrias de vidro e projetos sociais para reuso), garantindo que os subprodutos derivados da reciclagem permaneçam e fomentem a economia da própria região geradora do passivo.

Além de todos os pontos discutidos referente as placas fotovoltaicas, os entrevistados também alertaram sobre o crescimento de resíduos de outros componentes das usinas fotovoltaicas atuais, em especial os inversores que parecem ter um caminho mais definido, e futuras, como o uso de baterias de lítio para armazenar energia de dia e liberar a noite, usadas tanto nos sistemas fotovoltaicos quanto na nova geração de carros elétricos. Assuntos não tratados neste trabalho, mas que também devem ser ponto de atenção para pesquisas futuras.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cadeia curta é uma rede responsável pela reciclagem de materiais de uma localidade específica enquanto desenvolve e comercializa produtos derivados destes resíduos na mesma região onde eles são descartados. Dessa forma, a Cadeia Curta depende de uma gestão integrada

do desenvolvimento de produtos, de uma escala suficiente de produtos a recuperar, de adaptação na legislação e políticas para proporcionar um ecossistema viável para gerar valor e impactos não só em contextos ambientais, mas também sociais.

No contexto da cadeia curta, faz-se necessário o desenvolvimento de produtos que atendam demandas locais a partir de materiais reciclados localmente, diminuindo assim os custos de transporte e armazenagem com a inclusão de recicladores locais.

Ao concluir esta pesquisa no polo de Geração Distribuída de Uberlândia (MG), consolida-se a resposta ao objetivo geral deste estudo: analisar como os princípios das Cadeias Curtas de Suprimentos podem ser mobilizados para estruturar a logística reversa regional e viabilizar o reaproveitamento de resíduos fotovoltaicos no contexto de Uberlândia. Os achados de campo demonstram que as Cadeias Curtas de Suprimentos (CCS) atuam como um arranjo complementar indispensável ao setor, estruturado sobre quatro pilares operacionais integrados: proximidade geográfica, consolidação logística local, reaproveitamento territorial e articulação em rede. Longe de propor uma substituição da cadeia centralizada comum, o modelo descentralizado de circuitos curtos prova-se um caminho viável para mitigar custos de transporte e reter valor socioeconômico diretamente na região geradora do resíduo.

Esse propósito foi alcançado de forma integrada ao longo das etapas da pesquisa. O mapeamento da destinação atual revelou um fluxo reverso ainda incipiente e oneroso, onde o descarte precoce de módulos avariados em transporte ou instalação resulta em acúmulo informal nos integradores ou envio oneroso a aterros industriais. Diante disso, o trabalho identificou oportunidades reais de valorização local, abrangendo desde o reuso de módulos de segunda mão (second-life) para demandas energéticas descentralizadas até soluções de downcycling de utilidade social e escoamento de subprodutos como vidro e alumínio para indústrias da região. Por fim, essa transição foi consolidada no framework prático proposto, que integra a Matriz de Transição e as Diretrizes Estratégicas para conectar geradores e recicladores locais de maneira replicável.

Ao projetar o futuro para além das barreiras financeiras imediatas e da atual assimetria de custos do setor — no qual a reciclagem industrial ainda é mais onerosa do que o valor de revenda dos materiais recuperados —, este trabalho vislumbra um cenário em que a escassez de recursos minerais virgens e o crescimento exponencial do volume de resíduos reverterão essa inviabilidade temporal. À medida que as usinas se aproximam do término de seu ciclo de vida, a mineração urbana regionalizada deixará de ser um diferencial voluntário de sustentabilidade corporativa para se tornar uma salvaguarda à segurança de suprimento de

materiais. É sob essa perspectiva de transição temporal e espacial que se apresentam as implicações teóricas e práticas a seguir

5.1. Implicações Teóricas

Sob a perspectiva teórica, este trabalho traz avanços ao conectar duas áreas do conhecimento que costumam caminhar de forma separada na literatura de gestão: as Cadeias Curtas de Suprimentos (Short Supply Chains) e a Economia Circular aplicada a resíduos de alta tecnologia. Historicamente, os estudos sobre cadeias curtas concentram-se no setor agroalimentar, em que autores como Paciarotti e Torregiani (2021), Migliore, Schifani e Cembalo (2015), Aguiar, Delgrossi e Thomé (2018) e Jarzębowski et al. (2020) investigam a redução de intermediários e a proximidade entre produtores e consumidores no campo. Ao expandir essa lógica para o contexto dos resíduos fotovoltaicos em fim de vida útil, a pesquisa demonstra que a aproximação geográfica e a regionalização das operações não servem apenas para garantir o frescor de um produto, mas constituem a condição fundamental para a viabilidade econômica e logística da recuperação de materiais complexos e pesados. Essa abordagem alinha-se e aprofunda as raras iniciativas que buscam aproximar a cadeia curta da reciclagem industrial, como nos estudos de Pilla Jr., Pimenta e Oliveira (2024) para embalagens plásticas e de Rigillo et al. (2020) para resíduos da construção civil.

Paralelamente, o trabalho enriquece o debate sobre Economia Circular no setor solar. A literatura recente divide-se predominantemente entre pesquisas técnicas focadas em processos físicos, químicos ou térmicos de separação de componentes — a exemplo de Wang et al. (2022), Vinayagamoorthi et al. (2024) e Lim et al. (2022) — e pesquisas de gestão voltadas a modelos regulatórios globais, como discutido por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022), M. S. Chowdhury et al. (2020) e Xu, Liu e Mo (2024). A contribuição teórica desta dissertação reside no preenchimento de um gargalo crítico apontado por El-Khawad, Bartkowiak e Kümmerer (2022) e Pilla Jr., Pimenta e Oliveira (2024): a ausência da dimensão territorial na transição circular. O estudo mostra que os modelos tradicionais de circuito fechado (closed-loop supply chains) mostram-se economicamente inviáveis quando dependem de redes logísticas altamente centralizadas e de longas distâncias. Assim, demonstra-se que a circularidade do setor fotovoltaico depende intrinsecamente do fator espacial, uma vez que encurtar as rotas reduz a pegada de carbono do próprio transporte reverso, evita o descarte precoce em aterros e viabiliza a manutenção de recursos valiosos, como silício, prata, alumínio e cobre, dentro da própria economia regional.

5.2. Implicações Práticas

Do ponto de vista prático e operacional, a pesquisa oferece respostas concretas para a inviabilidade financeira e logística enfrentada por integradores e distribuidores na gestão das placas descartadas. Essas contribuições foram consolidadas na Matriz de Transição e no conjunto de Ações Estratégicas propostos pelo trabalho. A Matriz de Transição atua como uma ferramenta diagnóstica que confronta diretamente os gargalos da cadeia comum com as soluções da cadeia curta. Na prática, o modelo demonstra como substituir a dependência de plantas de reciclagem distantes por estruturas descentralizadas, tais como unidades regionais de processamento e contêineres móveis direcionados a grandes usinas em processo de repotenciação. Para resolver a pulverização de pequenos volumes na geração distribuída, propõe-se a criação de pontos de consolidação regional e rotas de coleta compartilhada (milk run), transformando descartes isolados e inviáveis em lotes economicamente atraentes. Além disso, a matriz enfatiza o desenvolvimento de mercados compradores locais no entorno da região geradora — como fundições e indústrias de vidro —, garantindo que os subprodutos reciclados sejam absorvidos sem gerar novos custos de frete e mantendo a retenção do valor econômico no próprio território.

Complementarmente, as propostas de Ações Estratégicas desdobram essa transição em um roteiro prático para gestores e formuladores de políticas públicas. A implementação desse ecossistema circular fundamenta-se no mapeamento prévio da densidade e idade das usinas locais para prever o momento exato do descarte, na organização de redes regionais de captação e no fomento ao reuso seguro de módulos ainda funcionais em projetos sociais e comunitários. O roteiro contempla também o incentivo à conscientização da rede para eliminar o acúmulo informal de passivos em galpões, a articulação com o poder público para criação de incentivos fiscais e a desoneração do produto reciclado, além do estímulo à pesquisa em Design for Recycling para o desenvolvimento de painéis mais fáceis de desmontar. Em suma, o conjunto dessas ações práticas sugere que a adoção das cadeias curtas pode eliminar fretes desnecessários, viabilizando um modelo de negócios regionalmente sustentável e preparado para absorver o volume expressivo de resíduos fotovoltaicos previsto para as próximas décadas.

Trazendo novos conceitos para as cadeias curtas com foco no aproveitamento de placas fotovoltaicas através da reorganização de suas cadeias e implementação de processos regionais de reciclagem, elaborou-se o Quadro 9: “Ação – Efeito – Impacto Sistêmico” visando entender como as ações na cadeia curta evoluem até produzir transformações sistêmicas.

Palavras-Chave (Ações Estratégicas)	Efeito Direto (Resultado Imediato)	Impacto Sistêmico (Geração de Valor)
Mapear e Rastrear: Mapear regiões com alta densidade de placas, avaliando tipo de painel e tempo de instalação.	Previsibilidade sobre quando e onde ocorrerão os maiores volumes de EOL ou processos de repotenciação.	Otimização na alocação de investimentos, definindo o local e o timing exato para instalação de recicladoras regionais.
Descentralizar Operações: Instalar recicladoras regionais e operacionalizar contêineres móveis para áreas de alta demanda.	Processamento de resíduos (EOL ou avarias) feito próximo às usinas descentralizadas, diminuindo distâncias de transporte e custos operacionais	Redução drástica do Custo Total de Propriedade (TCO) no descarte, viabilizando economicamente a logística reversa fotovoltaica e reduzindo emissões
Desenvolver Clientes Locais: Estruturar compradores regionais para os subprodutos separados (vidro, alumínio, silício, chumbo).	Escoamento imediato dos materiais processados sem a necessidade de novos fretes longos.	Autossuficiência financeira da cadeia curta e fortalecimento efetivo da economia circular e regional.
Fomentar o Reuso: Estruturar o reaproveitamento físico de placas inteiras e o reuso energético de módulos de repotenciação.	Atendimento de demandas energéticas sociais (ex: bombeamento de água, escolas) e novos usos estruturais.	Prolongamento do ciclo de vida útil do equipamento e redução da pegada de carbono, fortalecendo o marketing verde, inclusão social e sustentabilidade
Conscientizar e Integrar: Divulgar a viabilidade técnica da reciclagem local e a existência de recicladores capacitados.	Eliminação da ociosidade das recicladoras e melhor direcionamento do descarte pelos distribuidores e integradores.	Consolidação da rede fotovoltaica como um ecossistema integrado que se responsabiliza pelo produto de ponta a ponta.
Articular Incentivos Públicos: Desenvolver estímulos financeiros e governamentais iniciais para reciclagem em Geração Distribuída (GD).	Viabilização das operações de reciclagem regional no estágio atual de baixos volumes de descarte.	Desenvolvimento da infraestrutura reversa, Aceleração da maturidade do mercado de reciclagem fotovoltaico e prevenção em larga escala de contaminação ambiental.
Desenvolver tecnologias de separação de materiais: por meio de incentivos à pesquisas aplicadas regionais e projetos de módulos mais recicláveis	Melhoria da pureza dos subprodutos, desenvolvimento de soluções locais e facilitação na desmontagem	Aumento da viabilidade industrial da reciclagem, estruturação de ecossistemas regionais e sustentabilidade do ciclo produtivo

Quadro 9 - Proposta de ações para implementação de cadeias curtas de reciclagem

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3. Limitações de Estudo

Como qualquer investigação científica de caráter exploratório, este estudo apresenta delimitações e fronteiras analíticas que devem ser explicitadas para o correto enquadramento e ponderação de seus resultados. Tais restrições dividem-se em aspectos de recorte espacial, escala empírica, natureza metodológica e temporalidade das percepções investigadas.

A primeira limitação reside no recorte e restrição geográfica da pesquisa de campo, cujo foco empírico central concentrou-se no polo de Geração Distribuída de Uberlândia e sua região imediata. Embora a captação de dados tenha incluído elos externos necessários para a modelagem da cadeia reversa real — abrangendo uma planta especializada em Valinhos (SP), distribuidoras em São José do Rio Preto (SP) e São Paulo (SP), e representação de gestão em Belo Horizonte (MG) —, a infraestrutura logística, as tarifas tributárias locais e

as sinergias industriais de mercado avaliadas refletem as particularidades socioespaciais e logísticas deste eixo do Sudeste brasileiro. Dessa forma, as especificidades operacionais de Uberlândia podem não representar fielmente os desafios e as barreiras regulatórias ou espaciais de outros ecossistemas de geração solar distribuída em estados ou regiões com características demográficas e geográficas distintas.

A segunda restrição refere-se ao baixo volume atual de resíduos fotovoltaicos em circulação, o qual limita o alcance empírico das análises e a rastreabilidade dos fluxos de fim de vida. Conforme constatado junto aos atores de campo e à recicladora parceira, o fluxo reverso gerado no Brasil hoje é composto quase que exclusivamente por descartes antecipados (avarias prematuras decorrentes de sinistros ou falhas de manuseio e transporte), dado que o mercado nacional é jovem e as usinas ainda estão distantes de atingir os 25 anos de vida útil projetada. Esse reduzido volume operacional atual impede que as empresas testem, na prática diária, mecanismos de escala industrial e dificulta que os entrevistados tenham uma percepção baseada em dados históricos consolidados de descarte, limitando a acurácia de suas avaliações sobre o comportamento de fluxos futuros em larga escala.

Metodologicamente, impõe-se a impossibilidade de generalização estatística dos resultados, decorrente da natureza qualitativo-exploratória da pesquisa e do método de seleção dos sujeitos por meio de amostragem não probabilística por conveniência e bola de neve (*snowball*). O corpus analítico de 15 informantes-chave qualifica-se como representativo e suficiente sob o critério de saturação teórica para compreender as lógicas de coordenação e as dores de mercado, mas seus achados destinam-se unicamente à generalização analítica e conceitual. Os dados empíricos gerados refletem percepções interorganizacionais de um grupo qualificado de gestores, não devendo ser extrapolados estatisticamente para inferir comportamentos populacionais de todo o setor de integração e distribuição nacional.

Por fim, destaca-se o caráter eminentemente prospectivo das expectativas de viabilidade econômica mapeadas no estudo. Diferentemente de cadeias reversas já consolidadas, a estruturação de um ecossistema local de reciclagem fotovoltaica em Uberlândia fundamenta-se em percepções e expectativas de viabilidade futura compartilhadas pelos agentes. No cenário vigente, a reciclagem industrial ainda carece de viabilidade financeira autônoma e comprovada em campo devido à assimetria entre os altos custos logísticos e o baixo valor de revenda de materiais recuperados frente ao preço em declínio das placas

novas. Portanto, a atratividade do modelo de cadeia curta aqui proposto baseia-se em cenários futuros de escassez e no ganho de escala projetado para as próximas décadas, constituindo uma proposição de valor a ser testada e validada empiricamente conforme o mercado avance em termos de maturidade tecnológica e regulatória.

5.4. Sugestões para Pesquisas futuras

A consolidação de um modelo de economia circular e logística reversa regionalizada para o setor fotovoltaico abre diversas frentes de investigação para a comunidade científica de gestão de operações e engenharia. Diante disso, delineiam-se caminhos estratégicos para estudos subsequentes.

Em primeiro lugar, em consonância com as preocupações levantadas em campo, recomenda-se a investigação sistemática do ciclo de vida e das rotas de destinação de outros componentes críticos que integram as usinas fotovoltaicas, com especial destaque para os inversores e os sistemas de armazenamento baseados em baterias de íon-lítio. À medida que a mobilidade elétrica avança e os sistemas híbridos com armazenamento se popularizam, esses equipamentos enfrentarão o esgotamento de seu ciclo de vida útil ativa. Recomenda-se que pesquisas futuras explorem a aplicação de premissas de cadeias curtas para esses resíduos complexos, analisando a viabilidade de processos regionais de remanufatura, segunda vida útil de baterias e mitigação de riscos de toxicidade e lixiviação de substâncias químicas perigosas, conforme alertado pelas discussões emergentes de Slattery, Dunn e Kendall (2024).

Em segundo lugar — atendendo diretamente à necessidade de consolidar o rigor metodológico e a abrangência conceitual do framework proposto —, sugere-se testar e avaliar a replicabilidade do Modelo Conceitual do Fluxo da Cadeia Curta Fotovoltaica (Figura 5) em outras regiões geográficas e contextos de mercado. Como aponta a literatura clássica de redes descentralizadas (Paciarotti; Torregiani, 2021), a validação científica de cadeias curtas inovadoras depende de analisar se os modelos de sucesso podem ser adaptados, replicados e escalados sob diferentes fronteiras políticas, infraestruturas viárias, densidades de usinas solares e arranjos de indústrias recicladoras locais. Pesquisas futuras de caráter comparativo — tanto em nível nacional quanto internacional — poderiam aplicar este framework em recortes regionais com características socioeconômicas, demográficas e regulatórias distintas (como regiões de menor densidade demográfica ou de maior centralização tributária), verificando as

condições necessárias para que a rede curta de reciclagem solar seja auto-sustentável e replicável.

Adicionalmente, sugere-se a realização de estudos quantitativos para calcular os custos e a viabilidade financeira exata desse modelo de rede. Pesquisas futuras podem desenvolver simulações matemáticas para descobrir, com precisão, qual é o volume mínimo de painéis descartados e qual é a distância máxima de transporte que tornam a reciclagem regional lucrativa. Isso ajudará a definir de forma prática em quais situações vale a pena abrir uma planta de reciclagem física em uma determinada cidade ou quando é preferível utilizar unidades móveis de reciclagem (contêineres) para fazer o processamento diretamente no local. Esse tipo de análise matemática permitirá traduzir as expectativas futuras de viabilidade coletadas nesta dissertação em dados de decisão concretos e aplicáveis para empresas e governos.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Micro e Minigeração Distribuída**. Brasília, DF: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 7 jun. 2026.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Unidades com Geração Distribuída**: painel em Power BI. Brasília, DF: ANEEL, 2026. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>

AGUIAR, Luane da Conceição; DELGROSSI, Mauro Eduardo; THOMÉ¹, Karim Marini. Short food supply chain: characteristics of a family farm. **Ciência Rural**, v. 48, n. 5, p. e20170775, 2018. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170775>

ALEKSIC, Biljana et al. The application of FMEA analysis in the short cheese supply chain. **Scientific journal" Meat Technology"**, v. 61, n. 2, p. 161-173, 2020. <https://doi.org/10.18485/meattech.2020.61.2.6>

AL ZAABI, B.; GHOSH, A. Managing photovoltaic waste: sustainable solutions and global challenges. **Solar Energy**, v. 283, p. 112985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112985>

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.

BAUER, M. W.; GASKELL, G. **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático**. Petrópolis: Vozes, 2002

BIANCHIN, Victor. Busca-se uma alternativa: o silício caiu tanto de preço que agora as molduras são as partes mais caras dos painéis solares. **Xataka Brasil**, 1 mar. 2025. Disponível em: <https://www.xataka.com.br/engenharia/busca-se-uma-alternativa-silicio-caiu-preco-que-agora-as-molduras-sao-as-partes-mais-caras-dos-paineis-solares>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BIERNACKI, P.; WALDORF, D. Snowball Sampling: Problems and Techniques of Chain Referral Sampling. **Sociological Methods & Research**, v. 10, n. 2, p. 141–163, 1981. <https://doi.org/10.1177/004912418101000205>

- BURGESS, Patrick R.; SUNMOLA, Funlade T. Prioritising requirements of informational short food supply chain platforms using a fuzzy approach. **Procedia Computer Science**, v. 180, p. 852-861, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.335>
- CHOWDHURY, Md Shahariar et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, v. 27, p. 100431, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- CHOWDHURY, Mohammad Javed Morshed et al. A Blockchain-Enabled Circular Economy: Collaborative Responsibility in Solar Panel Recycling. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2024. <https://doi.org/10.1109/MIE.2024.3378422>
- COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. de; ASSUNÇÃO, G. M. A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: analysis of the National Solid Waste Policy. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 1-28, 2020. <https://doi.org/10.5585/geas.v10i10.16147>
- D'ADAMO, I.; FERELLA, F.; GASTALDI, M.; IPPOLITO, N. M.; ROSA, P. Circular solar: evaluating the profitability of a photovoltaic panel recycling plant. **Waste Management & Research**, v. 41, p. 1144-1154, 2023. <https://doi.org/10.1177/0734242X221149327>
- DE FAZIO, Manfredi. Agriculture and sustainability of the welfare: the role of the short supply chain. **Agriculture and agricultural science procedia**, v. 8, p. 461-466, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.044>
- DE LIMA DUARTE, Sthefane Cristina; THOMÉ, Karim Marini. Short food supply chain: estado da arte na academia brasileira. **Estudos Sociedade e Agricultura**, 2015.
- DIVYA, A. et al. Review on recycling of solar modules/panels. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 253, p. 112151, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112151>
- DUNAY, Anna et al. Short supply chain: goals, objectives and attitudes of producers. **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 15, n. 6, p. 199-217, 2018. <https://doi.org/10.12700/APH.15.6.2018.6.17>
- EL-KHAWAD, Livia; BARTKOWIAK, Dorota; KÜMMERER, Klaus. Improving the end-of-life management of solar panels in Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, p. 112678, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112678>
- ESMAEILI, Maryam; ALLAMEH, Ghazaleh; TAJVIDI, Taraneh. Using game theory for analysing pricing models in closed-loop supply chain from short-and long-term perspectives.

International Journal of Production Research, v. 54, n. 7, p. 2152-2169, 2016.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115907>

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

GLASER, B.; STRAUSS, A. The Discovery of Grounded Theory: Strategies For Qualitative Research. London: Routledge, 2017. (Originalmente publicado em 1967).
<https://doi.org/10.4324/9780203793206>

GÖNEN, Çağdaş; KAPLANOĞLU, Elif. Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 4, p. 412-418, 2019.
<https://doi.org/10.1177/0734242X19826331>

GREENER. **Estudo Estratégico 2024**: Geração Distribuída: mercado fotovoltaico (referente ao ano de 2023). São Paulo: Greener, mar. 2024. Disponível em:
<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2024/>. Acesso em 26/05/2024

IRENA, I. P. End-of-life management: solar photovoltaic panels. **International renewable energy agency and international energy agency photovoltaic power systems**, 2016.

JARZĘBOWSKI, S.; BOURLAKIS, M.; BEZAT-JARZĘBOWSKA, A. Short food supply chains (SFSC) as local and sustainable systems. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4715, 2020.
<https://doi.org/10.3390/su12114715>

KISS, Konrád; RUSZKAI, Csaba; TAKÁCS-GYÖRGY, Katalin. Examination of short supply chains based on circular economy and sustainability aspects. **Resources**, v. 8, n. 4, p. 161, 2019.
<https://doi.org/10.3390/resources8040161>

KOKUL, S. Ram; BHOWMIK, Shantanu. Recycling of crystalline silicon photovoltaic solar panel waste to modified composite products. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, v. 37, n. 4, p. 327-339, 2021. <https://doi.org/10.1177/14777606211019416>

LANKAUSKIENĖ, Rita; VIDICKIENĖ, Dalia; GEDMINAITĖ-RAUDONĖ, Živilė. Evolution of short food supply chain theory and practice: Two-sided networks and platforms. **Energies**, v. 15, n. 3, p. 1137, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15031137>

LI, M et al. A methodology to liberate critical metals in waste solar panel. **Applied Energy**, v. 337, p. 120900, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120900>

- LIM, Mitchell Shyan Wei et al. Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, p. 130796, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130796>
- MAGHRABY, Yasmin R. et al. Towards sustainability via recycling solar photovoltaic Panels, A review. **Solar Energy**, v. 285, p. 113085, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113085>
- MIGLIORE, Giuseppina; SCHIFANI, Giorgio; CEMBALO, Luigi. Opening the black box of food quality in the short supply chain: Effects of conventions of quality on consumer choice. **Food Quality and Preference**, v. 39, p. 141-146, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.07.006>
- MIRABELLA, Nadia; CASTELLANI, Valentina; SALA, Serenella. LCA for assessing environmental benefit of eco-design strategies and forest wood short supply chain: a furniture case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1536-1550, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0757-7>
- MONTEIRO, José; BARATA, João. Artificial intelligence in extended agri-food supply chain: A short review based on bibliometric analysis. **Procedia Computer Science**, v. 192, p. 3020-3029, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.074>
- NDALLOKA, Zita Ngagoum et al. Solar photovoltaic recycling strategies. **Solar Energy**, v. 270, p. 112379, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112379>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>
- PACIAROTTI, Claudia; TORREGIANI, Francesco. The logistics of the short food supply chain: A literature review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 428-442, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.002>
- PARK, YeongHyeon et al. Boost-up efficiency of defective solar panel detection with pre-trained attention recycling. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 3, p. 3110-3120, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3255227>
- PEDROSO, R. N. S.; SANTOS, L. R.; PIRES, R. C. S. Um futuro problema com o descarte de painéis solares. **Construção civil: engenharia e inovação**, Rio de Janeiro, v. 5, p. 204-213, 2023. <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2023724p204>

- PILLA JR, Paschoal José de; PIMENTA, Márcio Lopes; DE OLIVEIRA, Bruno Garcia. A framework for product development based on recycled plastic from pesticide packaging: A study of short supply chains from the perspective of circular economy. **Cleaner Production Letters**, v. 7, p. 100080, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100080>
- POLITA, Fabíola Sostmeyer; MADUREIRA, Livia. Evolution of short food supply chain innovation niches and its anchoring to the socio-technical regime: the case of direct selling through collective action in north-West Portugal. **Sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13598, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132413598>
- PATÓ, B.; KISS, F. Short supply chains from an intermediary's point of view. **On-Line Journal Modelling the New Europe**, n. 34, p. 168-183, 2020. <https://doi.org/10.24193/OJMNE.2020.34.09>
- RAFTOWICZ, M.; KALISIAK-MĘDELSKA, M.; STRUŚ, M. Redefining the supply chain model on the Milicz carp market. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 2934, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12072934>
- RAHMAN, Md Mostafizur; CHOWDHURY, Farah Noshin. Recycling of solar PV panels in Bangladesh along with South and South East Asia. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 44, p. 100862, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100862>
- RAMÍREZ-CANTERO, Javier et al. State of the art of end-of-life silicon-based solar panels recycling with a bibliometric perspective. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 281, p. 113312, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113312>
- RIGILLO, Marina et al. SHORT supply chain of waste flows: Designing local networks for landscape regeneration. **Detritus**, v. 11, p. 35-44, 2020. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13969>
- RUSZKAI, C.; PAJTÓK TARI, I.; PATKÓS, C. Possible actors in local foodscapes? LEADER action groups as short supply chain agents: a European perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2080, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13042080>
- SANCHEZ, F. A. C.; BOUDAUD, H.; CAMARGO, M.; PEARCE, J. M. Plastic recycling in additive manufacturing: a systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121602, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>

SCHELLER, C.; SCHMIDT, K.; SPENGLER, T. S. Effects of network structures on the production planning in closed-loop supply chains: a case study based analysis for lithium-ion batteries in Europe. **International Journal of Production Economics**, v. 262, p. 108892, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108892>

SHARMA, Hari Bhakta et al. Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. **Science of the Total Environment**, v. 780, p. 146645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146645>

SIVAGAMI, K. et al. Solar Panel Recycling from Circular Economy Viewpoint: A Review. **Applied Solar Energy**, v. 60, n. 2, p. 328-345, 2024.

<https://doi.org/10.3103/S0003701X23601862>

SLATTERY, Margaret; DUNN, Jessica; KENDALL, Alissa. Charting the electric vehicle battery reuse and recycling network in North America. **Waste Management**, v. 174, p. 76-87, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.018>

TSANAKAS, J. A. et al. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 28, n. 6, p. 454-464, 2020. <https://doi.org/10.1002/pip.3193>

VARGAS, Carlos; CHESNEY, Marc. End of life decommissioning and recycling of solar panels in the United States: a real options analysis. **Journal of Sustainable Finance & Investment**, v. 11, n. 1, p. 82-102, 2021. <https://doi.org/10.1080/20430795.2019.1700723>

VENKATACHARY, Sampath Kumar et al. Economics and impact of recycling solar waste materials on the environment and health care. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, p. 101130, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101130>

VINAYAGAMOORTHY, R. et al. Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 111715, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>

WANG, Shuai; SHEN, Yansong. Particle-scale modelling of the pyrolysis of end-of-life solar panel particles in fluidized bed reactors. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 183, p. 106378, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106378>

WANG, Xiaopu et al. A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 248, p. 111976, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976>

WIEDENROTH, Christoph F.; OTTER, Verena. Can new healthy luxury food products accelerate short food supply chain formation via social media marketing in high-income countries?. **Agricultural and Food Economics**, v. 10, n. 1, p. 31, 2022. <https://doi.org/10.1186/s40100-022-00238-3>

XU, Tiantong; LIU, Diyi; MO, Lipo. Policy design of government subsidy for end-of-life solar panel recycling. **Applied Mathematical Modelling**, v. 129, p. 390-407, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.01.047>

XU, X.; YANG, Y. Analysis of the dilemma of promoting circular logistics packaging in China: a stochastic evolutionary game-based approach. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 12, p. 7363, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph19127363>. Acesso em: 26 jun. 2025.

XU, Yan et al. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste management**, v. 75, p. 450-458, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

YUAN, Rong et al. The short-term impact of US-China trade war on global GHG emissions from the perspective of supply chain reallocation. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 98, p. 106980, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106980>

ZIMON, D.; TYAN, J.; SROUFE, R. Drivers of sustainable supply chain management: practices to alignment with UN sustainable development goals. **International Journal for Quality Research**, v. 14, n. 1, p. 219-236, 2020. <https://doi.org/10.24874/IJQR14.01-14>

APÊNDICES

APÊNDICE A – Roteiro de Entrevista para Integradores

Quanto tempo de atuação da empresa com energia fotovoltaica?

Qual o volume de placas fotovoltaicas comercializadas pela empresa nos últimos 12 meses?

Qual a quantidade de sistemas fotovoltaicos comercializados nos últimos 12 meses?

Houve atendimento a sistemas fotovoltaicos com placas defeituosas nos últimos 12 meses?

Caso positivo,

Qual a principal causa de defeito nas placas?

Quantas placas tiveram de ser retiradas dos sistemas?

Qual a destinação das placas retiradas dos sistemas?

Quais os custos envolvidos no processo de encaminhamento das placas defeituosas até sua destinação final?

Tendo em vista os conceitos de cadeia curta para reciclagem e a composição das placas fotovoltaicas, ou seja, pensando no desenvolvimento de produtos regionais para geração de trabalho e estímulo ao comércio local, que tipo de produtos se acredita que possam ser produzidos ou comercializados com poucos recursos a partir das placas fotovoltaicas ou de seus componentes com interesse na economia regional?

APÊNDICE B – Roteiro de Entrevista para Empresas de Reciclagem

Como funciona o processo de reciclagem das placas fotovoltaicas?

De onde vêm as placas defeituosas?

Como é o processo logístico para trazer as placas defeituosas até o ponto de reciclagem?

Qual o volume de placas recicladas nos últimos 12 meses?

Qual a principal avaria encontrada nas placas recebidas para reciclagem?

Quais os produtos da reciclagem das placas?

Como é comercializado o produto da reciclagem das placas fotovoltaicas?

Quais os clientes do produto das placas recicladas e onde eles se encontram?

Pensando em cadeia curta, seria factível fazer a reciclagem regionalmente das placas ou seus componentes? Seria viável o desenvolvimento de um produto a partir das placas e seus componentes com interesse local, que minimizasse os custos de frete e movimentasse a economia na região onde estão as placas hoje?

Faz sentido um controle de onde estão instalados os sistemas e tempo de instalação visando o desenvolvimento regional de recicladores ou informando ao mercado o produto desenvolvido a partir de reciclagem de placas fotovoltaicas?

APÊNDICE C – Roteiro de Entrevista para Distribuidores

Qual o volume de placas comercializadas mensalmente nos últimos 12 meses?

Qual a quantidade de placas devolvidas nos últimos 12 meses?

Como funciona esta logística reversa?

Qual a tratativa para as placas recolhidas?

Pensando numa cadeia de suprimentos mais curta, seria possível uma reciclagem dos resíduos das placas mais próximo do local de coleta das placas? É viável o desenvolvimento, com poucos recursos, de um produto com interesse local a partir dos resíduos das placas que pudesse evitar os custos de transporte e movimentar a economia regional?

Faz sentido após a reciclagem identificar os produtos oriundos deste processo para fins de divulgação e controle de seu aproveitamento?