



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO ELÉTRICA DO
CENTRO TECNOLÓGICO

Julia Gomes Pereira

**LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS:
PROPOSTA DE INDICADORES PARA UMA EMPRESA NA GRANDE
FLORIANÓPOLIS**

Florianópolis
2025

Julia Gomes Pereira

**LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS:
PROPOSTA DE INDICADORES PARA UMA EMPRESA NA GRANDE
FLORIANÓPOLIS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Elétrica do Centro Tecnológico do Campus Trindade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica com habilitação em Engenharia de Produção.

Orientadora: Caroline Rodrigues Vaz, Dra.

Coorientadora: Leandra Silvestre, Ma.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Pereira, Julia Gomes

Logística reversa de inversores fotovoltaicos: proposta de indicadores para uma empresa na grande Florianópolis / Julia Gomes Pereira ; orientadora, Caroline Rodrigues Vaz, coorientador, Leandra Silvestre da Silva Lima, 2025.

120 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Elétrica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Elétrica. 2. Logística Reversa. 3. Inversores Fotovoltaicos. 4. Indicadores. I. Vaz, Caroline Rodrigues. II. Lima, Leandra Silvestre da Silva. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Elétrica. IV. Título.

Julia Gomes Pereira

**LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS:
PROPOSTA DE INDICADORES PARA UMA EMPRESA NA GRANDE
FLORIANÓPOLIS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica com habilitação em Engenharia de Produção” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Produção Elétrica do Centro Tecnológico.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2025.



Documento assinado digitalmente
Monica Maria Mendes Luna
Data: 05/12/2025 09:40:50-0300
CPF: ***.104.993-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Mônica Mendes Luna, Dra.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Caroline Rodrigues Vaz
Data: 05/12/2025 07:14:34-0300
CPF: ***.381.109-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Caroline Rodrigues Vaz, Dra.
Orientadora

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina,
Brasil

Profa. Fabiana Raupp, Dra.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina,
Brasil

Este trabalho é dedicado às minhas avós — vó Pedra e vó Neda — com todo o meu amor e saudade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço às minhas queridas avós — vó Pedra (*in memoriam*) e vó Neda (*in memoriam*) — por me ensinarem, com gestos simples e corações imensos, o verdadeiro significado do amor. Com vocês aprendi que o sentido da vida está nas pequenas coisas, nos sorrisos, nas histórias contadas à mesa e nos afetos que trocamos no caminho. Concluir essa etapa nos custou muitos cafés da tarde a menos, mas levo comigo cada lembrança e o conforto de saber que estariam orgulhosas deste momento. Agradeço também aos meus pais, que foram e são o meu porto seguro, apoiando—me com amor, paciência e força em cada passo dessa caminhada. Este sonho é tão meu quanto de vocês.

Aos amigos feitos ao longo da graduação, agradeço por cada sorriso, cada conversa (na sala de aula ou no bar) e por compartilharem comigo os desafios e as conquistas desse caminho. Vini, Le, Felipe, Ana, Lívia, Ruan, Guta e Matheus: obrigada por tornarem essa caminhada mais leve, divertida e inesquecível. Mas é às minhas amigas de infância — Letícia, Naya e Bianca — que dedico um agradecimento especial. Vocês presenciaram todas as minhas versões: as tentativas, os erros, os recomeços, as alegrias e as frustrações. Foram minha família escolhida, o meu abrigo, e me lembraram em todos os momentos, da minha essência. E ao Pedro, por diariamente não me deixar desanimar, por acreditar em mim até quando eu duvidei, e por ser a minha força em cada etapa deste processo. A cada palavra de carinho, conselho ou abraço apertado, encontrei o impulso para seguir e me reencontrar.

Agradeço a todos os professores e professoras que cruzaram o meu caminho, desde o Colégio Murialdo até a UFSC. Cada um, com sua dedicação e paciência, deixou um pedacinho de si na minha formação e me mostrou que o conhecimento é a maior herança que alguém pode ter. Mesmo em um país em que a educação é pouco valorizada, vocês seguem firmes, acreditando no poder transformador do ensino e se dedicando ao futuro de desconhecidos. Um agradecimento especial, à minha orientadora, Caroline, e à minha coorientadora, Leandra, que com sabedoria, paciência e incentivo constante, tornaram possível o que antes era apenas uma ideia, e me ensinaram, acima de tudo, que a ciência também se faz com sensibilidade e empatia.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, agradeço pelas oportunidades oferecidas e por possibilitar, com excelência, a transformação da realidade das pessoas. Aqui aprendi muito mais do que está no currículo do curso — aprendi sobre respeito à diversidade, compromisso coletivo e a responsabilidade de pertencer a uma comunidade. Sou grata também à empresa que gentilmente disponibilizou tempo e recursos essenciais para a realização do estudo de caso deste trabalho, em especial ao meu antigo orientador de estágio, Sumar, que me ensinou muito além da engenharia — ensinou a ser humano no ambiente profissional.

*“Ninguém pode entrar duas vezes no mesmo rio,
pois quando nele se entra novamente,
não se encontra as mesmas águas,
e o próprio ser já se modificou. ”
(Heráclito, 600 a.C.)*

RESUMO

O crescimento da energia solar no Brasil, impulsionado por políticas públicas e pela busca por fontes renováveis, tem ampliado a demanda por sistemas fotovoltaicos e, consequentemente, por inversores fotovoltaicos, equipamentos essenciais para a conversão de energia elétrica. Esses dispositivos são classificados como eletroeletrônicos e por isso apresentam desafios ambientais e regulatórios ao final de sua vida útil, exigindo práticas de logística reversa eficientes para garantir destinação adequada, reaproveitamento de materiais e conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nesse contexto, os indicadores tornam-se fundamentais para monitorar e otimizar processos, assegurando eficiência operacional, viabilidade econômica e melhoria desses sistemas. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo propor indicadores para a logística reversa de inversores fotovoltaicos em uma empresa de grande porte situada na Grande Florianópolis (SC). A pesquisa, de natureza básica, descritiva e abordagem mista, foi conduzida em três etapas: revisão sistemática da literatura pelo método PRISMA; estudo de caso com entrevistas, análise documental e observação direta; e aplicação do método Delphi em duas rodadas com especialistas e acadêmicos para avaliação dos indicadores. Como resultado da primeira etapa, foram identificados 24 indicadores na literatura os quais, na segunda etapa, foram acrescidos aos dois indicadores utilizados pela empresa e agrupados em cinco dimensões: financeira, operacional, ambiental, social e legal. Após a aplicação da terceira etapa, dez indicadores foram propostos para implementação imediata, incluindo custos totais de logística reversa, retorno financeiro, eficiência operacional, giro de estoque, qualidade do serviço, gestão de resíduos, conformidade regulatória, satisfação dos clientes, saúde e segurança. Outros nove indicadores foram classificados para validação futura, enquanto um foi descartado por baixa aplicabilidade. Conclui-se que a adoção de indicadores específicos é essencial para monitorar e aprimorar processos, garantindo conformidade legal, redução de impactos ambientais e geração de valor econômico. A principal contribuição do estudo reside na proposição de um conjunto de indicadores aplicáveis e validados, que pode servir como referência para outras organizações do setor, fortalecendo práticas eficientes e eficazes de logística reversa de inversores fotovoltaicos.

Palavras-chave: Logística Reversa 1. Inversores Fotovoltaicos 2. Indicadores 3.

ABSTRACT

The growth of solar energy in Brazil, driven by public policies and the search for renewable sources, has increased the demand for photovoltaic systems and, consequently, for photovoltaic inverters, essential equipment for the conversion of electrical energy. These devices are classified as electro-electronic and therefore present environmental and regulatory challenges at the end of their useful life, requiring efficient reverse logistics practices to ensure proper disposal, reuse of materials, and compliance with the National Solid Waste Policy (PNRS). In this context, performance indicators become fundamental to monitor and improve processes, ensuring operational efficiency, economic vision, and the improvement of these systems. Given this scenario, this work aimed to provide performance indicators for the reverse logistics of photovoltaic investments in a large company located in Greater Florianópolis (SC). The research, of a basic, descriptive nature and mixed-methods approach, was conducted in three stages: a systematic literature review using the PRISMA method; a case study with interviews, document analysis, and direct observation; This study involved applying the Delphi method in two rounds with experts and academics to evaluate the indicators. As a result of the first stage, 24 indicators were identified in the literature. In the second stage, the two indicators used by the company were added and grouped into five dimensions: financial, operational, environmental, social, and legal. After the third stage, ten indicators were proposed for immediate implementation, including total reverse logistics costs, financial return, operational efficiency, inventory turnover, service quality, waste management, regulatory compliance, customer satisfaction, and health and safety. Other new indicators were selected for future validation but were discarded due to low applicability. It is concluded that the adoption of specific indicators is essential to monitor and improve processes, ensuring legal compliance, reducing environmental impacts, and generating economic value. The main contribution of the study lies in proposing a set of provisional and validated indicators that can serve as a reference for other organizations in the sector, strengthening efficient and effective reverse logistics practices for photovoltaic inverters.

Keywords: Reverse Logistics 1. Photovoltaic Inverters 2. KPI 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo de tomadas de decisões logísticas	8
Figura 2 – Etapas da recuperação de produtos	11
Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede e isolado	15
Figura 4 – Composição típica de preço de um sistema fotovoltaico	18
Figura 5 – Classificações de Pesquisa	24
Figura 6 – Classificação da Pesquisa	26
Figura 7 – Diagrama PRISMA dos procedimentos dessa pesquisa	29
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos dessa pesquisa	34
Figura 9 – Fluxograma simplificado dos processos de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa	45
Figura 10 – Cargo dos participantes	50
Figura 11 – Área de atuação dos participantes	50
Figura 12 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores financeiros de logística reversa de inversores fotovoltaicos	51
Figura 13 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores operacionais de logística reversa de inversores fotovoltaicos	52
Figura 14 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores ambientais de logística reversa de inversores fotovoltaicos	54
Figura 15 – Rodada 1: Avaliação indicadores legais de logística reversa de inversores fotovoltaicos	55
Figura 16 – Rodada 1: Avaliação indicadores sociais de logística reversa de inversores fotovoltaicos	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 2 – Comparativo entre atividades de logística direta e logística reversa . . .	10
Quadro 3 – Indicadores de logística mais mencionados	20
Quadro 4 – Principais dimensões dos indicadores em logística reversa	22
Quadro 5 – Etapas da pesquisa	27
Quadro 6 – Strings de busca	28
Quadro 7 – Escala Likert utilizada para avaliação dos indicadores	32
Quadro 8 – Documentos incluídos na análise	37
Quadro 9 – Frequência de palavras-chave	38
Quadro 10 – Indicadores de logística reversa de inversores fotovoltaicos descritos na literatura	40
Quadro 11 – indicadores de logística reversa de inversores consolidados por dimensão	41
Quadro 12 – indicadores em uso na logística reversa de inversores da empresa . . .	47
Quadro 13 – Indicadores de logística reversa de inversores por dimensão	49
Quadro 14 – Indicadores a serem implementados imediatamente	60
Quadro 15 – Indicadores para validação	62
Quadro 16 – Indicadores a serem descartados	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica por fonte em Megawatt (MW) – 2021 e 2022	4
Tabela 2 – Projeção de aumento da capacidade instalada por fonte (MW)	17
Tabela 3 – Rodada 1 — Estatísticas quantitativas por indicador	57
Tabela 4 – Rodada 2 - Aplicabilidade de cada indicador na empresa	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CapEx	Despesa de Capital
CSCMP	Council of Supply Chain Management Professionals
DC/AC	Corrente Alternada para Corrente Contínua
GCS	Cadeia de Suprimentos
IDEAL	Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina
IOT	Internet das Coisas
KPI	Indicadores-Chave de Desempenho
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCM	Programação e Controle de Materiais
PERS	Programa de Energia Renovável Social
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
REE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SCM	Supply Chain Management
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIN	Sistema Integrado Nacional
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.2.3	Justificativa	4
1.2.4	Delimitação do Trabalho	5
1.2.5	Estrutura da Pesquisa	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	LOGÍSTICA	7
2.1.1	Logística Reversa	8
2.1.1.1	Política Nacional de Resíduos Sólidos	12
2.1.2	Logística Reversa de Inversores	13
2.1.2.1	Componentes dos Inversores Fotovoltaicos	14
2.1.2.2	Energia Solar no Brasil	16
2.1.3	Indicadores de Logística Reversa	19
3	METODOLOGIA	24
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	24
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.2.1	Etapas 1: Análise da literatura dos indicadores aplicados na logística reversa para inversores fotovoltaicos	27
3.2.2	Etapas 2: Mapeamento das práticas de logística reversa de inversores fotovoltaicos na região da Grande Florianópolis - Estudo de Caso no setor de tecnologia	30
3.2.3	Etapas 3: Construção da Proposta de Indicadores de Logística Reversa de Inversores Fotovoltaicos para a empresa	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	ETAPA 1: ANÁLISE DA LITERATURA DOS INDICADORES APLICADOS NA LOGÍSTICA REVERSA PARA INVERSORES FOTOVOLTAICOS	36
4.2	ETAPA 2: MAPEAMENTO DAS PRÁTICAS DE LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS NA REGIÃO DA GRANDE FLORIANÓPOLIS - ESTUDO DE CASO NO SETOR DE TECNOLOGIA	42
4.2.1	A Empresa	42
4.2.2	A Área de Logística Reversa de Inversores	43
4.3	ETAPA 3: CONSTRUÇÃO DA PROPOSTA DE INDICADORES DE LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS PARA A EMPRESA	48
5	CONCLUSÃO	64

5.1	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTA ETAPA 2	78
	APÊNDICE B – RODADA 1 DO MÉTODO DELPHI	80
	APÊNDICE C – RODADA 2 DO MÉTODO DELPHI	92
	ANEXO A – INDICADORES DE DESEMPENHO LOGÍSTICO .	104

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização deste trabalho, seus objetivos, bem como a justificativa desta pesquisa, a delimitação definida e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde os primórdios da civilização, o ser humano explora os recursos naturais para suprir suas necessidades de consumo. Embora os padrões dessa exploração tenham se transformado ao longo do tempo, ela nunca deixou de ocorrer (Mushtaq; Bandh; Shafi, 2020). Com o avanço da tecnologia, o modo com que se produz sofreu importantes modificações e os grandes marcos desta evolução são chamados de Revolução Industrial. Desde a primeira, com o surgimento das máquinas, até a quarta, com a difusão da inteligência artificial e internet das coisas (IoT), a demanda por produtos se manteve-se crescente (Lima, 2023).

Entretanto, os recursos naturais do planeta, como água, matéria orgânica, minerais e combustíveis fósseis, são finitos e, portanto, limitados. A atual taxa de extração e consumo acelerado suscita preocupações sobre o possível esgotamento desses recursos, aumento da poluição e de acidentes ambientais (Mushtaq; Bandh; Shafi, 2020). Diante disso, as autoridades, empresas e consumidores foram obrigados a achar soluções a fim de frear essa dinâmica.

No Brasil, a questão regulatória se materializou a partir de leis como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, pioneira na América Latina ao regulamentar a gestão de resíduos sólidos e impor a responsabilidade compartilhada; e, mais recentemente, o Decreto nº 10.936/2022, que atualiza as obrigações para empresas, órgãos públicos e consumidores em conformidade com as novas dinâmicas do mercado (Brasil, 2010, 2022a). Esses instrumentos nacionais se relacionam com os compromissos assumidos internacionalmente, como os previstos na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e nos acordos firmados nas COPs, como o Acordo de Paris. Enquanto governos estabelecem leis e regulamentações restritivas, os consumidores exigem produtos e serviços ambientalmente responsáveis, e as empresas se adaptam para cumprir com as regulamentações e novas práticas de operação mais sustentáveis (Bottani *et al.*, 2020).

Entre as áreas que tiveram que se adequar a essa nova realidade, destaca-se a logística, tornando-se um componente chave para garantir a eficiência das cadeias de suprimentos sustentáveis. Ela pode ser definida como o processo de planejamento, implementação e controle eficiente e eficaz da movimentação e armazenamento de matérias-primas, estoque em processo, produtos acabados e informações relacionadas, desde o ponto de origem ao ponto de consumo, com a finalidade de atender os requisitos dos clientes (Council of

Supply Chain Management Professionals, 2024).

Inicialmente focada no transporte e armazenamento, a logística evoluiu para incorporar práticas mais atualizadas de gestão de estoques, distribuição e, mais recentemente, logística reversa. Este último aspecto ganha relevância na atualidade, pois permite o retorno de produtos ao ciclo produtivo, seja por meio da reciclagem, remanufatura ou reuso, mitigando o impacto ambiental e otimizando o uso dos recursos naturais (Bouzon *et al.*, 2010). Assim, enquanto as revoluções industriais impulsionaram a demanda e o consumo, a logística moderna busca equilibrar essa equação, promovendo a sustentabilidade e a eficiência econômica.

Desde o início deste século, a logística reversa tem se tornado um componente essencial nas estratégias de sustentabilidade das empresas, incluindo o setor de tecnologia e energia. A procura por soluções de energia renovável está em crescimento, o que reflete na demanda dos produtos necessários para o seu funcionamento (Ni; Chan; Tan, 2023). Uma das alternativas que mais cresce no Brasil é a geração solar, que consiste na conversão da radiação proveniente do sol em energia elétrica utilizável, sendo uma das fontes renováveis mais promissoras devido à sua abundância e capacidade de descentralização da geração (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025). Para isso ser possível um dos equipamentos indispensáveis é o inversor de corrente contínua para corrente alternada (DC/AC) (Nyamathulla; Chittathuru, 2023).

Os inversores DC/AC se classificam como produtos eletroeletrônicos, logo, possuem um ciclo de vida específico que necessita ser gerenciado de maneira a minimizar impactos ambientais e maximizar o valor econômico. Além da conversão de corrente, os inversores desempenham funções essenciais para a operação segura e eficiente dos sistemas fotovoltaicos. Eles são responsáveis por ajustar parâmetros elétricos como tensão, frequência e fator de potência, garantindo a compatibilidade com a rede elétrica (Gruezo-Valencia; Solis-Mora, 2022).

Por sua complexidade e composição, que envolve semicondutores, metais e polímeros, os inversores possuem uma vida útil média de 10 a 15 anos, tornando imprescindível o planejamento do seu ciclo de vida para reduzir impactos ambientais e viabilizar processos de reciclagem e reaproveitamento de materiais. O descarte incorreto gera impactos ambientais significativos, não só pelo volume e pelo tempo que o lixo eletrônico leva para se decompor, mas também pela presença de metais pesados em sua composição que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (Kumar Singh; Chauhan; Sarkar, 2022).

De acordo com Kanishka e Acherjee (2023) a logística reversa, no contexto dos inversores, não se limita apenas ao descarte adequado, mas por se tratar de um produto com alto valor agregado pode ser viável realizar processos de remanufatura, para gerar um novo valor aos produtos. Essa alternativa dá possibilidade de ampliação da participação das empresas no mercado com a venda de produtos remanufaturados. A prática não só oferece produtos economicamente mais viáveis, como também responde a uma demanda

crescente por soluções que respeitem o meio ambiente (Kanishka; Acherjee, 2023).

A remanufatura de inversores, portanto, surge como uma estratégia para empresas que buscam competitividade e inovação sustentável. No entanto, para que tais práticas sejam de fato eficazes e tragam benefícios concretos, é necessário monitoramento e avaliação contínua dos processos. Isso se torna possível por meio de ferramentas de medição e gestão, capazes de transformar informações em suporte para a tomada de decisão estratégica (Skubiq, 2024; Wibowo *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a utilização de indicadores surge como uma forma de acompanhamento os processos, visando a melhoria das atividades de logística reversa (Lenort *et al.*, 2022). Os indicadores de podem ser compreendidos como métricas quantitativas e/ou qualitativas que traduzem o comportamento de processos em informações objetivas, permitindo mensurar o alcance de metas e objetivos organizacionais (Maciel *et al.*, 2022). Segundo Tadesse *et al.* (2022), um sistema de medição de desempenho eficaz deve refletir tanto a eficiência operacional quanto a efetividade estratégica, fornecendo subsídios para decisões baseadas em evidências. Assim, esses indicadores permitem acompanhar resultados, identificar pontos de melhoria e verificar se as práticas adotadas estão alinhadas às exigências legais, ambientais e de mercado (de Oliveira Moraes; Moraes; de Oliveira Costa Neto, 2020). Além disso, possibilitam comparações entre diferentes períodos ou práticas, apoiando a melhoria contínua da cadeia de suprimentos reversa e contribuindo para a geração de valor econômico, social e ambiental (Werner *et al.*, 2020).

Diante desse cenário surge o questionamento: de que forma a logística reversa de inversores fotovoltaicos pode ser avaliada e aprimorada em uma empresa do setor de eletroeletrônicos, de modo a contribuir com o seu desempenho?

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.2.1 Objetivo Geral

Propor indicadores de à logística reversa de inversores fotovoltaicos com foco na geração de valor econômico, na otimização da eficiência operacional, cumprimento das normas e na redução do impacto ambiental de uma empresa de grande porte da região da Grande Florianópolis (SC).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar na literatura as abordagens de indicadores de aplicados à logística reversa, com foco em inversores fotovoltaicos;

- Mapear as práticas atuais de logística reversa de inversores fotovoltaicos em uma empresa do setor de tecnologia na região da Grande Florianópolis (SC);
- Elaborar uma proposta de indicadores de de logística reversa de inversores fotovoltaicos aplicáveis à empresa estudada.

1.2.3 Justificativa

Alinhado com a tendência mundial de práticas de consumo ambientalmente sustentáveis, o setor de energia busca alternativas de fontes limpas. Dentre elas, de acordo com o último estudo do Ministério de Minas e Energia (MME) a que mais cresceu em 2022 foi a energia solar, que vem recebendo investimentos privados e públicos, conforme os dados apresentados na Tabela 1 (Brasil. Ministério de Minas e Energia, 2023b).

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica por fonte em Megawatt (MW) – 2021 e 2022

Descrição	Unidade	2021	2022	Variação (%)
Hidroelétrica	MW	109.413,21	109.806,79	0,36
Hidrelétrica > 30 MW	MW	103.003,36	103.195,36	0,19
Hidrelétricas 1-30 MW	MW	5.513,05	5.662,02	2,70
Hidrelétricas ≤ 1 MW	MW	896,80	949,41	5,87
Eólica	MW	20.786,12	23.761,34	14,31
Solar	MW	13.403,57	24.452,86	82,44
Térmica	MW	44.981,60	46.440,26	3,24

Fonte: Brasil. Ministério de Minas e Energia (2023b).

A Tabela 1 mostra que entre as fontes de geração de energia elétrica, no Brasil, a energia solar foi a que mais cresceu em 2022. Destaca-se ainda o novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), que prevê a mudança da matriz energética para predominantemente fontes solares. Dados do Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração (RALIE) apresentam que de 2025 até 2031 a energia solar é a fonte com maior projeção de acréscimo da capacidade instalada em todos os anos, totalizando aproximadamente 115.000 MW de aumento (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025).

Os sistemas de geração de energia solar utilizam inversores de frequência, o que implica em um aumento proporcional na demanda por esses equipamentos. Como produtos eletrônicos, os inversores estão sujeitos aos regulamentos específicos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tornando crucial a implementação de processos eficientes e controladas de logística reversa para esses dispositivos (Brasil, 2022a).

Além de cumprir as obrigações legais, a criação de um canal de logística reversa pode recuperar valor aos produtos usados visto que esses equipamentos possuem alta participação nos preços dos sistemas de geração solar (Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, 2018). A remanufatura não só gera valor aos

produtos que antes seriam descartados, mas também amplia a participação das empresas no mercado ao oferecer soluções mais sustentáveis, economicamente viáveis e competitivas. Isso também melhora a imagem da marca entre os consumidores preocupados com o meio ambiente (Roudbari; Ghomi; Sajadieh, 2021).

A crescente conscientização global sobre as questões ambientais está impulsionando a demanda por meios de produção mais sustentáveis. A logística reversa desempenha um papel importante na redução do impacto ambiental causado pela disposição inadequada de produtos eletrônicos, como os inversores de energia solar. Ao promover a reciclagem, a remanufatura ou a correta destinação dos componentes, a logística reversa minimiza a geração de resíduos e a extração de recursos naturais, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental. Além disso, essas práticas ajudam a reduzir os riscos associados ao descarte inadequado de equipamentos eletrônicos, alinhando-se às expectativas de consumidores e reguladores (Bouzon *et al.*, 2010).

Apesar da importância da logística reversa para o setor de energia solar, ainda são escassos os estudos que analisam quais indicadores de são mais adequados para medir sua eficiência e eficácia, especialmente no contexto brasileiro. A eficiência refere-se à capacidade de utilizar os recursos disponíveis de forma otimizada, enquanto a eficácia diz respeito ao alcance dos objetivos propostos. No contexto da logística reversa, a distinção e padronização desses conceitos permitem mensurar o desempenho de maneira consistente e comparável entre empresas e períodos.

Esses indicadores viabilizam economicamente e adequam esses processos às regulamentações. Considerando o rápido crescimento da geração solar no país e a relevância dos inversores no custo total dos sistemas, avaliar e propor os indicadores de mais adequados à logística reversa desses equipamentos fortalece a sustentabilidade da cadeia produtiva e auxilia a destacar o Brasil como referência em energia limpa, gestão eficiente dos recursos e eficácia operacional.

1.2.4 Delimitação do Trabalho

O presente trabalho se propõe a analisar os indicadores de logística reversa de inversores utilizados nas operações de uma única empresa da Grande Florianópolis-SC, que está entre os 10 maiores fornecedores de inversores fotovoltaicos no Brasil (Casarin, 2024). Essa análise abrange os processos de coleta, reciclagem, remanufatura e disposição final dos inversores, considerando o sentido a montante e a jusante da cadeia de suprimentos da empresa.

Embora aspectos econômicos e financeiros sejam considerados de forma pontual, o foco principal do estudo não será uma análise detalhada dos custos envolvidos. O objetivo é entender as práticas atuais de avaliação da logística reversa e propor melhorias sem entrar nas minúcias financeiras dos processos.

Além disso este trabalho não tratará de uma análise comparativa do ciclo de vida completo dos inversores, apenas das atividades desenvolvidas na empresa do estudo. Devido a grande quantidade de variação de composição, não serão avaliados todos os componentes elétricos desses produtos.

Vale ressaltar que esta pesquisa foi delimitada a uma única empresa do setor de eletroeletrônicos localizada na região da Grande Florianópolis-SC. Dessa forma, é preciso cautela na aplicação em outras organizações, uma vez que os resultados podem variar em função de especificidades operacionais e geográficas.

1.2.5 Estrutura da Pesquisa

Nesta subseção é apresentada a estrutura deste trabalho, que está organizado em seis capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusão.

O primeiro capítulo apresenta uma visão geral do tema abordado, descrevendo o assunto objeto de estudo e o ponto de vista sob o qual ele foi analisado. Também são investigados trabalhos relacionados à temática, as justificativas que motivaram a escolha do tema e a pergunta de pesquisa. Nesta seção ainda são expostos o objetivo geral e os objetivos específicos. Por fim, é apresentada a delimitação do estudo, situando-se quanto ao escopo e as margens que serão respeitadas na pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, abordando os conceitos relacionados à logística reversa, energia solar, inversores fotovoltaicos e indicadores, estabelecendo a base teórica para a análise do estudo. O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos, incluindo a classificação da pesquisa, os procedimentos metodológicos e as etapas desenvolvidas.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia, organizados de acordo com as etapas do estudo de caso. E ainda discute os resultados à luz da literatura e do referencial teórico, destacando as contribuições e limitações do trabalho. Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões do estudo, ressaltando as principais contribuições da pesquisa e indicando sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do estudo, abordando o contexto de energia solar no Brasil, conceitos e práticas relacionadas à logística, logística reversa e suas normas, componentes dos inversores e indicadores.

2.1 LOGÍSTICA

A logística já estava presente nas primeiras organizações comerciais na época das grandes navegações, mesmo que não houvessem estudos sistemáticos dessas atividades (David, 2018). Nesse período ela se mostrava a partir de conhecimentos empíricos de quantos barcos ou animais seriam necessários para o transporte, quanto de suprimentos precisariam e qual a melhor forma de armazená-los. Foi durante o período Napoleônico que o cargo “marechal de logis” foi criado para formalizar a execução de atividades logísticas, que já eram realizadas há muito tempo, mas agora em um contexto de guerra (David, 2018). O estudo científico e a prática industrial da distribuição física e logística surgiu na década de 1960, momento em que os custos atribuídos a essas atividades eram elevados (Ballou, 2006).

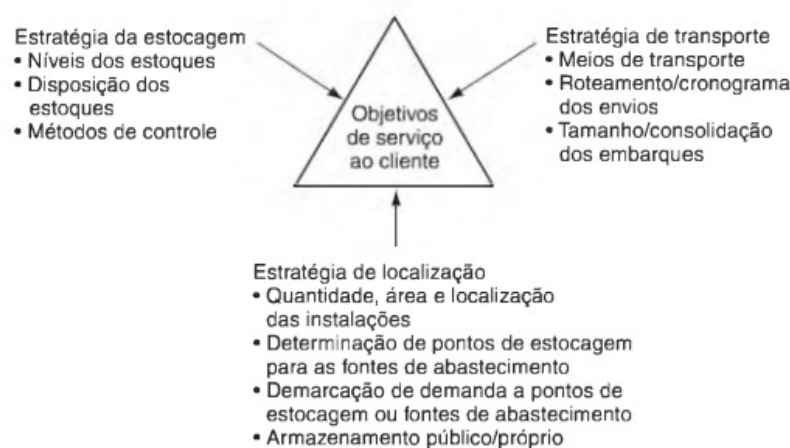
Council of Supply Chain Management Professionals (2024) descreve a gestão logística como a parte da gestão da cadeia de suprimentos (GCS) responsável pelo planejamento, implementação e controle eficiente e eficaz do armazenamento e do fluxo direto e reverso de bens, serviços e informações. O canal logístico, por sua vez, corresponde à sequência de pontos ou elos de diferentes localidades onde são realizadas as etapas de transformação da matéria-prima até o ponto de venda do produto final desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender às necessidades dos clientes de maneira otimizada (Council of Supply Chain Management Professionals, 2024; Schlegelmilch, 2022).

Na lógica de produção atual, marcada pela globalização, a logística tornou-se parte fundamental no crescimento das empresas privadas. Suas atividades permitem otimizar o fluxo de produtos, serviços e informações entre todos os agentes envolvidos no atendimento de um pedido, em ambos os sentidos (Hamdi; Abouabdellah, 2022). Nesse contexto, a adoção de tecnologias para o compartilhamento de informações e a promoção da colaboração entre os elos torna-se cada vez mais relevante, uma vez que cada elo agrega valor diferente ao produto por meio da transformação física, da movimentação, da armazenagem ou da prestação de serviços (slam; Monjur; Akon, 2023; Vidrová, 2020).

Segundo Neto (2022, p. 6): “Nos dias atuais, em que a velocidade com a qual os acontecimentos ocorrem é cada vez mais rápida, e a exigência do cliente é cada vez maior, os estudiosos que se dedicam à análise da logística são concordantes em indicar a competitividade como um fator vital”. A fim de atingir um bom desempenho, a logística possui um triângulo de estratégia que estrutura e define a operação. A decisão sobre essas

3 grandes variáveis impactam no nível de atendimento ao cliente e custos da operação, como mostra a Figura 1 (Ballou, 2006, p. 45).

Figura 1 – Triângulo de tomadas de decisões logísticas



Fonte: Ballou (2006, p. 45)

Como visto na Figura 1, além de impactar positivamente o desempenho financeiro das organizações, a logística empresarial pode contribuir na adaptação às demandas de sustentabilidade cada vez mais exigidas no mercado. Atualmente, um sistema logístico bem estruturado não só resulta em economia de recursos financeiros, mas também em uma redução no consumo de recursos naturais.

Com o aumento da preocupação com o impacto ambiental, surgiu uma subárea da logística focada no destino dos materiais após o término do ciclo produtivo. Assim como a logística direta, essa subárea se encarrega de planejar, operar e controlar o fluxo de produtos e informações, mas no sentido reverso. Conhecida como logística reversa, essa área se dedica à reintegração de produtos e materiais usados de volta à cadeia de suprimentos. Dessa forma, a logística empresarial se alinha com os princípios de sustentabilidade, essenciais para a manutenção da competitividade das empresas no mercado atual.

2.1.1 Logística Reversa

O modelo linear de produção, no qual os recursos são extraídos e transformados em produtos com tempo limitado de uso e que acabam em aterros sanitários, mostra-se cada vez mais insustentável e oneroso para as empresas. E, para mais, a crescente demanda por bens e serviços, somada à escassez de recursos naturais e à volatilidade dos preços, reforça sua inviabilidade no longo prazo (Hammes *et al.*, 2020).

Nesse cenário, a legislação começa a estabelecer normas para desacelerar o esgotamento dos recursos naturais. Além dos custos envolvidos, cresce a conscientização sobre os impactos do modelo linear no bem-estar do planeta, acompanhada por um senso de

urgência diante de suas consequências sociais e ambientais (Makarova *et al.*, 2021). Assim, em busca de um desenvolvimento mais alinhado às exigências legais e às expectativas dos consumidores, as empresas precisam reconsiderar o impacto ambiental de seus processos.

Com o aumento da geração de resíduos em escala global e visando à redução desses impactos ambientais, torna-se necessário coletar, reutilizar, reaproveitar ou reciclar esses materiais (Butt; Ali; Govindan, 2024). Contudo, a coleta envolve desafios logísticos significativos, como o elevado volume de emissões de carbono e a necessidade de implementar planos de transporte reverso, que frequentemente geram altos custos. Nesse contexto, os fabricantes precisam reestruturar seus sistemas logísticos (Sar; Ghadimi, 2023).

Como alternativa, surge a economia circular, frequentemente associada da logística reversa, oferecendo novos caminhos para a sustentabilidade empresarial. Esse conceito se tornou nas últimas décadas amplamente promovido pela União Europeia, por diversos governos nacionais — como China, Japão, Reino Unido, França, Canadá, Holanda, Suécia e Finlândia — e também por empresas em escala global (Makarova *et al.*, 2021). Contudo, sua aplicação ainda é limitada em países em desenvolvimento, como o Brasil, foco deste estudo (Hammes *et al.*, 2020).

Nessa visão, a vida de um produto não se encerra mais com a entrega ao consumidor. A logística reversa, segundo Guarnieri (2011), é a estratégia que viabiliza o retorno dos produtos vendidos ao ambiente de negócios e/ou produtivo. Além de cumprir os requisitos legais, a logística reversa proporciona um valor positivo de marketing, uma vez que os consumidores valorizam empresas comprometidas com a sustentabilidade (Guarnieri, 2011). No Quadro 2 é possível comparar as atividades realizadas na logística direta quando realizadas no ciclo reverso.

Quadro 2 – Comparativo entre atividades de logística direta e logística reversa

Logística Direta	Logística Reversa
Previsão relativamente alinhada	Previsão mais difícil
De um para muitos transportes	De muitos para um transporte
Qualidade do produto uniforme	Qualidade do produto não uniforme
Embalagem do produto uniforme	Embalagem geralmente danificada
Destinação/rota clara	Destinação/rota não clara
Canal padronizado	Orientado pela exceção
Opções de local de disposição claras	Opções de local de disposição não claras
Preço relativamente uniforme	Preço depende de muitos fatores
Importância da velocidade reconhecida	Velocidade geralmente não é prioridade
Custos de distribuição monitorados por sistemas de contabilidade	Custos reversos menos visíveis
Gerenciamento de estoques consistente	Gerenciamento de estoques inconsistente
Ciclo de vida do produto gerenciável	Questões de ciclo de vida mais complexas
Negociações entre membros do canal alinhadas	Negociações complicadas por fatores adicionais
Métodos de marketing bem conhecidos	Marketing dificultado (ex.: canibalização)
Informação em tempo real disponível	Visibilidade do processo menos transparente

Fonte: Adaptado de Tibben-Lembke e Rogers (2002)

Os produtos que retornam ao ciclo produtivo têm origem em dois canais principais: pós-venda e pós-consumo (Makarova *et al.*, 2021). A logística reversa de pós-venda está relacionada ao planejamento, controle e descarte de mercadorias não utilizadas ou pouco utilizadas, que retornam à cadeia de distribuição por diversos motivos, como prazos de validade expirados, excesso de estoque nos canais de distribuição, ou devoluções por defeito no produto. A segunda está relacionada a produtos em fim de vida, ou seja, que já foram utilizados e nesse caso a preocupação central é recuperação de valor ou destinação correto à esses resíduos (Kumar Singh; Chauhan; Sarkar, 2022). O fluxo reverso pode utilizar o canal logístico convencional de maneira total, parcial ou operar de forma completamente independente (Ballou, 2006).

Para González-Sánchez *et al.* (2020) o valor de um produto usado pode ser recuperado por outras alternativas aos processos de descarte em uma cadeia de suprimentos reversa, como reutilização, reparo, recondicionamento e remanufatura (González-Sánchez *et al.*, 2020). O reuso possui três formas mais comuns de ser realizado: o reparo, a remanufatura e o recondicionamento. O grau de garantia e qualidade dos processos envolvidos em cada modalidade varia, sendo maior para a remanufatura e menor para o reparo. Isso porque na remanufatura além das atividades de conserto dos produtos há o compromisso

de deixá-lo em “estado de novo” (Fang; Fan; Qiu, 2023). Após a recuperação de valor o objetivo desse mercado é revender esses produtos como “produtos remanufaturados” e este mercado precisa confiar na qualidade dos produtos recuperados para se tornar consolidado (Bouzon *et al.*, 2010). São muitas as diferenças da remanufatura para a manufatura tradicional, principalmente pela demanda incerta e variação do estado da matéria prima (produto retornado do cliente). Os processos mais comuns de remanufatura, como mostra a Figura 2, incluem a desmontagem, limpeza, inspeção, conserto ou substituição de peças, remontagem e teste.

Figura 2 – Etapas da recuperação de produtos



Fonte: Bouzon *et al.* (2010, p. 6)

No entanto, inúmeras empresas em redes logísticas contemporâneas não estão bem preparadas nem dispostas a enfrentar esses desafios. Na realidade a maioria dos produtos acabará sendo reciclada, incinerada ou aterrada, mas a remanufatura garante que o produto possa ter múltiplos ciclos de vida antes de chegar ao estágio em que não tem vida útil restante (RUL) e, portanto, pode ser reciclado, que é a opção de recuperação final (Fofou; Jiang; Wang, 2021).

Uma pesquisa sugere que menos de 10% dos fabricantes projetam seus produtos e embalagens considerando a logística reversa (Renewable-Matters, 2020). Além disso, muitos fabricantes ao redor do mundo ainda não dispõem de um departamento dedicado à logística reversa (Wilson; Paschen; Pitt, 2022).

Os incentivos para que empresas de logística invistam em logística reversa são reduzidos, uma vez que as margens de lucro são significativamente menores em comparação à logística direta. Além disso, a capacidade operacional nesse setor é limitada. Por exemplo, um estudo indicou que apenas 7 de 400 programas de treinamento em gestão da cadeia de suprimentos nos Estados Unidos incluíam conteúdos sobre logística reversa (Renewable-Matters, 2020). Consequentemente, os custos envolvidos dificultam a implementação eficaz da logística reversa em uma economia circular (Butt; Ali; Govindan, 2024).

O aumento da preocupação das organizações com a logística reversa mostra não só um compromisso com a sustentabilidade, mas também o cumprimento de obrigações legais. Esse movimento acompanha a criação de leis que dividem responsabilidades entre governo, empresas e consumidores (Zhang *et al.*, 2021; Sonar *et al.*, 2024). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e seus decretos são exemplos importantes, pois tornam práticas sustentáveis obrigatórias e incentivam a devolução e reaproveitamento de

produtos no ciclo produtivo (Pimentel *et al.*, 2024).

2.1.1.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Nº 12.305 em 2010, estabelece um marco regulatório abrangente para o manejo de resíduos sólidos no Brasil, destacando-se como a primeira regulamentação dessa natureza na América Latina (Vieira *et al.*, 2020). Ela definiu conceitos de responsabilidade compartilhada do ciclo de vida dos produtos pelos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana (Brasil, 2010).

Além disso, essa Lei estabelece a obrigatoriedade de planos de gerenciamento de resíduos e incentiva a implementação de programas de logística reversa, especialmente para produtos considerados perigosos ou de alto impacto ambiental, como os eletroeletrônicos. Adicionalmente, a lei define conceitos básicos, entre eles: ciclo de vida, resíduos sólidos, reciclagem, rejeitos, reutilização e logística reversa. Portanto a PNRS desempenhou papel importante na introdução dos conceitos legais ligados à sustentabilidade, a fim de incentivar os esforços para redução do impacto ambiental e fomentar práticas de desenvolvimento sustentável no território nacional (Brasil, 2010).

Com o avançar do desenvolvimento industrial do país, fez-se necessário atualizar a legislação para acompanhar as novas demandas do mercado, o avanço tecnológico e a crescente preocupação com o esgotamento de recursos naturais. O Decreto Nº 10.938 surge em 2022 para maior detalhamento das responsabilidades de cada elo da cadeia de logística reversa (Brasil, 2022a).

Parte do Decreto esclarece as obrigações e responsabilidades de empresas, do poder público e dos consumidores em relação aos resíduos sólidos gerados. Um dos aspectos é a inclusão e participação ativa dos catadores e operadores de resíduos, reconhecendo seu papel essencial no processo. Além disso, a política formaliza a implementação de planos de gerenciamento para assegurar que esses resíduos sejam tratados de maneira ambientalmente correta e sustentável, promovendo a reciclagem, o reaproveitamento e a redução de danos à natureza (Brasil, 2022a).

O Decreto Nº 10.938 aborda os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos de forma específica, reconhecendo sua complexidade e potencial impacto ambiental. De acordo com o Art. 14. do decreto os fabricantes, importadores, distribuidores e os comerciantes de produtos eletroeletrônicos e seus componentes devem estruturar, implementar e operar sistemas de logística reversa. De acordo com ela, as empresas fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos são responsáveis pelo ciclo de vida completo desses produtos, desde a produção até a destinação final, além de assegurar que esse processo seja econômico e financeiramente sustentável. Fala ainda que os responsáveis pela geração dos resíduos sólidos podem comprar ou criar postos de entrega

voluntária para esses materiais (Brasil, 2022a).

Portanto, no Brasil desde 2022 é obrigatório que as empresas de eletroeletrônicos, incluindo inversores, promovam política de destino correto aos produtos comercializados. Através da organização de um sistema de logística reversa os consumidores devem poder devolver os produtos após o uso para que sejam devidamente reciclados ou descartados. Esse sistema busca minimizar os impactos ambientais e de saúde pública associados aos resíduos eletrônicos, promovendo a reutilização de componentes e a recuperação de materiais valiosos, além de prevenir a contaminação por substâncias tóxicas presentes nesses dispositivos.

De acordo com a Resolução Nº 5998 de 2022 da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2022) um produto é considerado perigoso caso apresente risco para a saúde das pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente. Para esses produtos há um regime mais rigoroso de tratativa visto que o seu manuseio incorreto gera consequências ainda maiores. Os produtos eletrônicos inicialmente não se enquadram como produtos perigosos porém podem se tornar caso algum componente entre em contato com água (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2022). Nessa ocasião o produto se enquadra como substância oxidante, que corresponde à Classe 5 de risco nos números da Organização das Nações Unidas (ONU). Essa mudança implica tratativas mais controladas e rigorosas de transporte, manuseio e destino desses produtos.

Diante das exigências legais para produtos eletroeletrônicos no Brasil, é importante reconhecer que cada dispositivo possui particularidades quanto aos materiais que o compõem, ao padrão de consumo, ao processo produtivo e à durabilidade. Esses fatores influenciam as estratégias de logística reversa e as formas de tratamento ao final da vida útil. Por isso, compreender as características dos inversores fotovoltaicos é fundamental para definir os processos de logística reversa e, posteriormente, estabelecer indicadores que orientem essa prática.

2.1.2 Logística Reversa de Inversores

Frente ao crescimento da geração de energia solar, surge também a necessidade de considerar o destino dos inversores fotovoltaicos após a venda. Com a maior adoção dessa tecnologia, aumenta igualmente a quantidade de equipamentos que chegam ao fim de sua vida útil, reforçando a importância de estratégias eficazes para o descarte responsável e ambientalmente adequado desses dispositivos (de Almeida Xavier, 2024). A criação de canais de logística reversa estruturados de forma eficiente e eficaz contribuem para a gestão sustentável desses resíduos eletrônicos. Nesse sentido, a logística reversa deve se apoiar em práticas sustentáveis para lidar com o volume crescente de lixo eletrônico (Saffari, 2022).

Os inversores fotovoltaicos são classificados como produtos eletroeletrônicos pela PNRS de 2022 e, portanto, estão sujeitos ao Art. 14 desse decreto. Esse artigo especifica

as obrigações dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos e embalagens eletroeletrônicos. Entre essas obrigações está a responsabilidade de estruturar, implementar e operar um sistema de logística reversa para o retorno dos produtos e embalagens. Além disso, é necessário assegurar que esse sistema seja economicamente e financeiramente sustentável, garantindo que os resíduos sejam gerenciados de maneira ambientalmente adequada e em conformidade com as regulamentações vigentes (Brasil, 2022a).

A logística reversa dos inversores, por serem dispositivos eletroeletrônicos, devem incorporar uma rede envolvendo coleta, teste, reparo, reciclagem e recuperação de matéria-prima para minimizar o descarte de lixo eletrônico e garantir a sustentabilidade na cadeia de suprimentos. A primeira etapa dessa rede é a coleta. Fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes devem organizar pontos de entrega voluntária ou sistemas de coleta para facilitar o retorno dos inversores pelos consumidores. Este processo inicial é fundamental para assegurar que os dispositivos obsoletos sejam retirados de circulação de maneira segura e eficiente, prevenindo o descarte inadequado que poderia causar danos ambientais (Kumar Singh; Chauhan; Sarkar, 2022; Vargas; Campos; Luna, 2023).

A fim de compreender os desafios relacionados à logística reversa dos inversores fotovoltaicos, é necessário, inicialmente, conhecer a sua composição. Cada material presente nesses equipamentos apresenta características próprias que influenciam tanto o impacto ambiental quanto as possibilidades de reaproveitamento (Gervais *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2020). Metais, plásticos e componentes eletrônicos exigem formas distintas de tratamento, o que afeta diretamente a viabilidade de reciclagem, remanufatura ou descarte. Além disso, é necessário entender essa composição para atender às exigências legais, definir as estratégias mais adequadas e propor indicadores que reflitam a gestão desses resíduos (Kumar Singh; Chauhan; Sarkar, 2022).

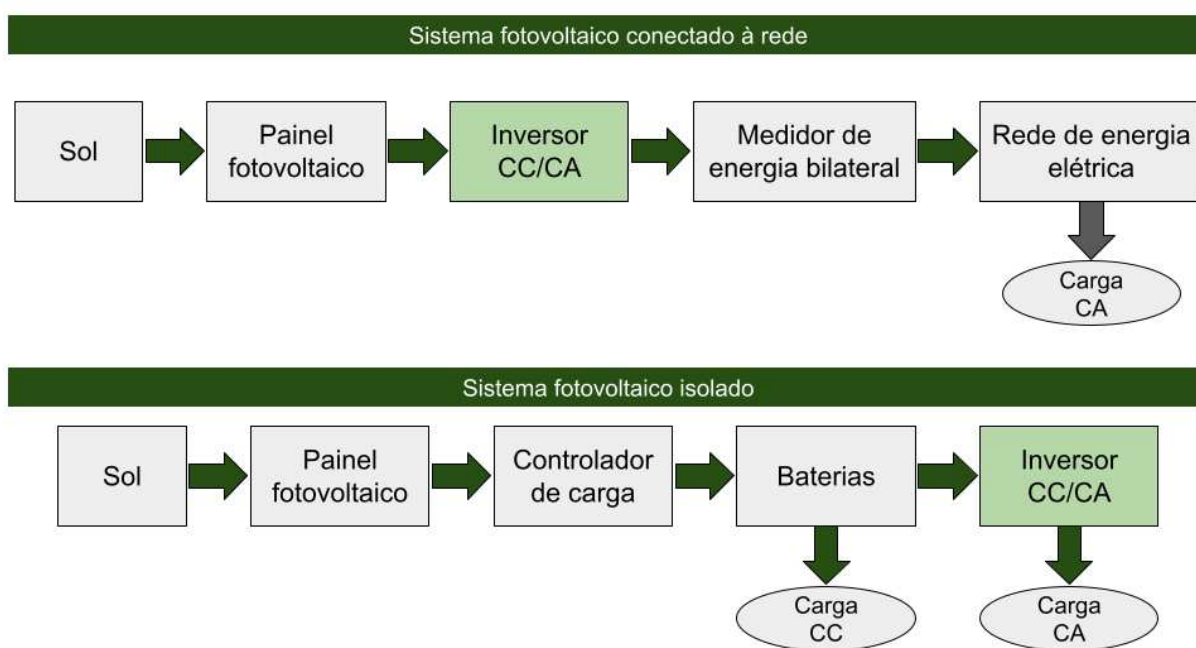
2.1.2.1 Componentes dos Inversores Fotovoltaicos

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa de geração de energia limpa, expansível e econômica que está em significativa expansão no Brasil e no mundo, pois utiliza recursos naturais inesgotáveis (Sarah; Roland; Ephraim, 2020). O conjunto básico de equipamentos necessários para essa geração contém em sua essência um bloco gerador e um bloco de condicionamento. No bloco gerador estão os arranjos fotovoltaicos, contendo módulos fotovoltaicos, cabeamento elétrico e estruturas sustentadoras. Já no bloco de condicionamento o principal componente é o inversor DC/AC, responsável por transformar a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada adequada para o consumo, além dos dispositivos de proteção e controle (da Silva; Araújo, 2022). Em sistemas sem conexão à rede de energia elétrica, muito raros no Brasil, há ainda um bloco de armazenamento (Machado *et al.*, 2022).

Para evitar danos aos dispositivos elétricos e industriais que irão consumir a energia, é essencial que a corrente de saída do transformador seja compatível com a rede elétrica. Portanto, além de converter a energia, o inversor deve garantir que a qualidade da saída atenda aos padrões de tensão, frequência e Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (Gruezo-Valencia; Solis-Mora, 2022).

Como mostra a Figura 3, esses dispositivos eletroeletrônicos são utilizados tanto em sistemas conectados à rede quanto isolados.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede e isolado



Fonte: Adaptado de NeoSolar Energia (2020)

Para realizar a conversão de energia os inversores fotovoltaicos são constituídos de componentes eletrônicos e mecânicos. De acordo com da Silva e Araújo (2022) e Stavinskii e Koshkin (2021) os componentes eletrônicos mais comuns, destacam-se:

- a) Semicondutores: fundamentais para a comutação da corrente de forma rápida e eficiente;
- b) Transformadores: normalmente feitos de aço e resina, ajustam a tensão de saída do inversor para ser compatível com a desejada;
- c) Capacitores: com composição variada, são utilizados na placa de circuito impresso para suavizar e/ou filtrar a corrente;
- d) Indutores: compostos por elementos elétricos condutores e isolantes, filtram e suavizam as ondas de corrente;

- e) Controladores e processadores: são conjuntos de componentes eletrônicos que gerenciam a operação do inversor;
- f) Filtros de saída: combinam capacitores e indutores para ajudar a reduzir os harmônicos da onda de corrente alternada na saída do inversor;
- g) Dispositivos de proteção: incluem sensores, fusíveis e disjuntores, que protegem contra condições operacionais diversas de tensão, corrente e temperatura;
- h) Cabos e conectores: feitos de metal, têm a função de ligar os componentes elétricos, formando os circuitos necessários.

Além dos componentes elétricos, os inversores fotovoltaicos possuem componentes mecânicos essenciais, como dissipadores de calor, feitos de materiais condutores, e carcaças, geralmente de metal ou plástico, que protegem e estruturam o dispositivo. As diferentes combinações desses elementos resultam na variedade de inversores disponíveis no mercado, cada um destinado a aplicações específicas. Eles podem ser classificados de acordo com o princípio de operação, o tipo de ligação aos sistemas, a quantidade de fases e a presença de transformadores (Gruezo-Valencia; Solis-Mora, 2022).

De acordo com o exposto acima, a composição dos inversores fotovoltaicos é variada e predominantemente formada por componentes eletrônicos, o que reforça a necessidade de estratégias adequadas para o tratamento desses produtos ao final da vida útil. Essa discussão se relaciona diretamente ao contexto brasileiro, onde a rápida expansão da energia solar tem elevado significativamente o número de inversores em circulação. Assim, é pertinente compreender a evolução e a relevância da energia solar no Brasil.

2.1.2.2 Energia Solar no Brasil

A geração de energia solar é o processo de conversão da luz do sol em eletricidade, uma tecnologia que só é possível graças à descoberta do efeito fotovoltaico por Alexandre Edmond Becquerel em 1839. Este fenômeno permite que os painéis fotovoltaicos capturem a radiação solar e a transformem em energia elétrica utilizável (Anne *et al.*, 2023). Esse método de geração de energia é renovável, sustentável e contribui com a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo uma matriz energética mais limpa e diversificada (da Silva; Araújo, 2022).

O Sistema Fotovoltaico pode ser Conectado à Rede (SFCR), integrando-se ao Sistema Integrado Nacional (SIN). Nesse caso, a energia gerada e não consumida pelo proprietário se converte em "créditos de energia" na concessionária. Alternativamente, o sistema pode ser isolado da rede, utilizando um banco de baterias para armazenar a energia gerada, sendo mais comum em zonas rurais distantes da rede de distribuição ou para necessidades específicas. Em ambos os casos, a geração de energia deve estar de acordo com a Lei Nº 14.300 de 2022, que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração

distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) (Brasil, 2022b).

O Brasil é privilegiado no contexto da energia fotovoltaica devido aos altos níveis de radiação solar que recebe. A irradiação média anual no Brasil varia entre 1200 e 2400 kWh/m²/ano, significativamente superior à da Alemanha, país que está no topo da lista de maiores geradores, onde varia entre 900 e 1250 kWh/m²/ano. Apesar desse potencial, a adoção de sistemas fotovoltaicos no Brasil enfrenta desafios, sendo o principal deles o custo elevado. A instalação de sistemas fotovoltaicos ainda é cara, em grande parte devido à necessidade de importação dos módulos, uma vez que o Brasil não possui indústrias locais suficientes para suprir a demanda desse segmento (da Silva; Araújo, 2022).

Entre janeiro e setembro de 2023, o Brasil alcançou um marco histórico no incremento da capacidade de geração solar centralizada, registrando o maior aumento já visto. Durante este período, foram instalados 3 Gigawatts (GW) de capacidade solar, superando o acréscimo anual de 2022, que foi de 2,5 GW. Esse crescimento recorde destaca a importância crescente da energia solar no país e sua contribuição significativa para a futura matriz energética nacional (Brasil. Ministério de Minas e Energia, 2023a).

Segundo dados do MME, as usinas de energia fotovoltaica desempenharão um papel crucial no futuro energético do Brasil, especialmente no contexto do novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Estima-se que essas usinas responderão por 8,5 GW, mais da metade da geração de energia prevista pelo PAC. O investimento previsto para a expansão da energia fotovoltaica é substancial, totalizando R\$ 41,5 bilhões. Este investimento não apenas fortalece a infraestrutura energética do Brasil, mas também promove a sustentabilidade e a redução de emissões de gases de efeito estufa (Brasil. Ministério de Minas e Energia, 2023a).

De acordo com as projeções do relatório que acompanha a expansão da oferta de geração de energia elétrica de todos os empreendimentos em implantação no Brasil, expostas na Tabela 2 elaboradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2025), observa-se um crescimento expressivo da capacidade instalada proveniente de fontes renováveis, em especial da energia solar (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025).

Tabela 2 – Projeção de aumento da capacidade instalada por fonte (MW)

Fonte	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	Total
Biomassa	88	209	85	38	40	760	688	1.908
Eólica	1.398	419	433	63	–	14.573	2.960	19.846
Fóssil	645	2.124	591	–	–	–	142	3.502
Hídrica	99	106	196	26	21	275	31	754
Nuclear	–	–	–	–	–	–	–	–
Solar	2.168	7.392	5.781	1.788	3.491	84.647	10.407	115.674
Total	4.398	10.249	7.086	1.915	3.553	100.255	14.228	141.684

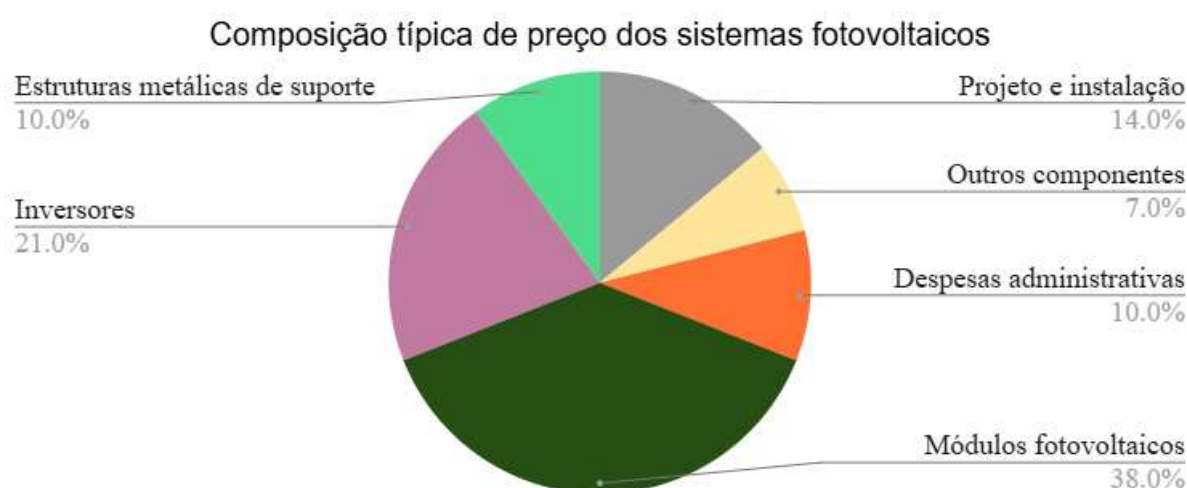
Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2025).

Conforme apresentado na Tabela 2, a geração solar concentra a maior expansão prevista em todos os anos até 2031, com destaque para a entrada de mais de 84 GW somente em 2030. A crescente capacidade de geração por fonte solar no planejamento energético nacional reforça a necessidade de estratégias adequadas para a gestão do ciclo de vida dos equipamentos associados, cujo volume em circulação tende a aumentar significativamente

Os sistemas de geração fotovoltaica são formados minimamente por: módulos fotovoltaicos, responsáveis pela transformação de luz solar em eletricidade, inversores, que convertem a corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada, estruturas de sustentação, que suportam e fixam os módulos e condutores elétricos para fazer as ligações elétricas entre esse sistema. Porém para sistemas isolados é indispensável o banco de baterias e para os conectados ao SIN equipamentos de medição bidirecional de energia (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018).

A Figura 4, apresenta a participação média dos componentes típicos no preço de sistemas fotovoltaicos, no qual inclui: (i) módulo fotovoltaicos, responsáveis pela geração de energia através do sol, (ii) inversores fotovoltaicos, que transformam a corrente contínua em corrente alternada;, (iii) projeto e instalação, que envolve o planejamento e execução da instalação do sistema elétrico; (iv) estruturas metálicas de suporte, que fornecem suporte físico e fixação dos módulos fotovoltaicos; (v) despesas administrativas, que abrangem os custos de gestão, licenciamento e outras despesas operacionais; e (vi) outros componentes, que podem incluir cabos, conectores, dispositivos de proteção e sistemas de monitoramento (Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, 2018).

Figura 4 – Composição típica de preço de um sistema fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (2018)

A Figura 4 mostra que os módulos fotovoltaicos e os inversores representam a

maior parcela dos custos de um sistema solar. Com a expansão prevista da energia solar no Brasil, projeta-se também um aumento significativo na quantidade desses equipamentos em circulação, o que torna essencial planejar o seu tratamento no fim da vida útil (Souza; Figueiredo; dos Santos Bortolucci Espejo, 2024). Nesse contexto, a logística reversa possibilita a reintegração desses materiais ao ciclo produtivo, seja por meio da remanufatura, do reuso ou da reciclagem, contribuindo para o fortalecimento de práticas sustentáveis e para a maior eficiência da cadeia de suprimentos (Fang; Fan; Qiu, 2023).

Neste cenário, a logística reversa apresenta-se como uma oportunidade significativa para gerar valor adicional aos produtos desse sistema. Implementando processos eficientes de logística reversa, como a reciclagem ou remanufatura, as empresas podem reduzir custos, diminuir a dependência de importações e prolongar a vida útil dos equipamentos (Sousa; Oliveira; Cunha, 2022). Além disso, essas práticas sustentáveis contribuem para a redução do impacto ambiental, promovendo uma economia que beneficia tanto o setor empresarial quanto a sociedade como um todo (Anne *et al.*, 2023).

Para que a logística reversa atribua um novo valor a esses produtos, a definição e o monitoramento de indicadores permitem mensurar resultados, avaliar a efetividade das ações implementadas e orientar melhorias contínuas, contribuindo para a viabilidade econômica e socioambiental dessas práticas.

2.1.3 Indicadores de Logística Reversa

Os indicadores, também chamados de indicadores-chave de desempenho (KPI), são instrumentos utilizados para avaliar a eficiência e a eficácia dos processos organizacionais, fornecendo subsídios para a melhoria contínua de seus processos (Gackowiec *et al.*, 2020). O acompanhamento das atividades por meio de indicadores constitui uma prática consolidada na gestão organizacional, sendo essencial para identificar, mensurar, compreender e controlar o desempenho das operações (Villazón *et al.*, 2020). Tais indicadores representam medidas quantitativas e/ou qualitativas que traduzem o alcance de metas previamente estabelecidas, possibilitando alinhar as atividades operacionais às estratégias corporativas. Assim, ao oferecerem informações objetivas e mensuráveis, os indicadores permitem não apenas avaliar a eficiência dos processos internos, mas também a eficácia das ações na geração de valor (Shah *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, com o mercado cada vez mais competitivo, a utilização de indicadores expandiu-se para além da dimensão puramente financeira, incorporando perspectivas relacionadas ao cliente, marketing e vendas, processos operacionais e cadeia de suprimentos, colaboradores e responsabilidade social corporativa (Marr, 2012; Global Reporting Initiative, 2021). A diversidade de abordagens reflete o aumento das exigências por parte de consumidores e do governo de práticas mais transparentes, eficientes e responsáveis em suas operações.

No campo da logística, os indicadores também possuem papel relevante, uma vez que permitem mensurar o desempenho de todos os elos envolvidos e avaliar a capacidade de atender às necessidades do cliente com qualidade e custo competitivo (Chopra; Meindl, 2016). Esses indicadores acompanham o andamento e o resultado das atividades, contribuindo para o controle de variáveis críticas, como tempo de ciclo, confiabilidade de entregas, custos logísticos e níveis de serviço, possibilitando maior integração entre os agentes e a busca pela eficiência global da cadeia.

Para Tadesse *et al.* (2022), os indicadores logístico podem ser agrupados em três grandes focos: operação de porto seco, transporte e gestão de armazém. Nos portos secos, sobressaem o tempo de giro (30,4 % segundo clientes) e a frequência de danos (29,6 % segundo prestadores). No transporte, os mais relevantes são segurança (24,4 %) e disponibilidade (20,5 %). Já nos armazéns, os destaques são o lead time do pedido (24,3 %) e a acuracidade dos pedidos (20,7 %). Contudo, diferentes abordagens podem atribuir pesos distintos aos indicadores, refletindo suas prioridades e percepções sobre eficiência (Tadesse *et al.*, 2022).

Em uma revisão de literatura apresentada no Anexo A, Gozacan-Chase e Lafçı (2020, p. 2) identificaram 116 indicadores relacionados à logística (Gozacan-Chase; Lafçı, 2020). A variedade de indicadores identificados, demonstra a amplitude de variáveis que podem ser mensuradas em cadeias logísticas, abrangendo dimensões financeiras, operacionais, sociais e legais. Dentre eles, os autores destacam os indicadores de mais mencionados na revisão bibliográfica, apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Indicadores de logística mais mencionados

Indicador	Definição
Entrega/expedição pontual	Os produtos corretos são entregues corretamente no momento certo.
Tempo de atendimento (lead time)	Tempo entre a realização do pedido e a entrega do produto correto, sem danos.
Pedido em atraso / ruptura de estoque	O pedido não pode ser entregue devido à falta de produtos adequados disponíveis em estoque.
Erro de envio	Número de erros relacionados a remessas, como embalagens com rótulos incorretos, desconsideração de dimensões da embalagem, etc.
Taxa de preenchimento	Razão entre o volume do veículo efetivamente utilizado e o volume total disponível.

Fonte: Adaptado de Gozacan-Chase e Lafçı (2020, p. 26)

Complementarmente, Lenort *et al.* (2022) destaca que, na era da Logística 4.0, torna-se preciso adotar indicadores ligados à todos os aspectos da cadeia de suprimentos, inclusive a economia circular, abrangendo dimensões econômicas, ambientais, sociais e legais ligadas ao fluxo direto e reverso. Além disso, reforça que o alinhamento entre

objetivos estratégicos e métricas de sustentabilidade é decisivo para gerar valor à longo prazo. Com isso, a adoção de indicadores direcionados à logística reversa não gera ganho apenas em eficiência operacional, mas também de sustentabilidade, ao mitigar os impactos ambientais associados a todo o ciclo de vida do produto (Lenort *et al.*, 2022).

Da mesma forma que os indicadores da logística tradicional mensuram a eficácia e a eficiência da gestão logística — responsável pelo planejamento, implementação e controle do fluxo direto de bens e serviços —, no fluxo reverso também é possível utilizar essas métricas como ferramentas de monitoramento e melhoria contínua dos processos (Council of Supply Chain Management Professionals, 2024; Wibowo *et al.*, 2022).

Para Kazançoğlu *et al.* (2020), a crescente preocupação da sociedade com os impactos ambientais de seu consumo, aliada à pressão de um mercado cada vez mais competitivo, tem levado as empresas a expandir suas práticas de logística reversa. Mas para que esse setor gere valor de forma efetiva, a utilização de indicadores torna-se importante (Kazançoğlu *et al.*, 2020). A aplicação desses indicadores, nesse contexto, possibilita acompanhar resultados, apoiar decisões gerenciais e garantir a conformidade legal e socioambiental. Além disso, contribuem para a minimização de desperdícios, a otimização de recursos, influenciando o desempenho financeiro das empresas e fortalecendo suas práticas de sustentabilidade (Ahlström *et al.*, 2020).

Porém a mensuração do desempenho em logística reversa envolve múltiplas dimensões da sustentabilidade e da gestão operacional (Silvestre, 2023). Diferentes setores, desde o têxtil até o alimentício podem utilizar de indicadores para avaliar os impactos ambientais e a viabilidade econômica e social das operações de logística reversa (Chaves; Giuriatto; Ferreira, 2020). O Quadro 4 sintetiza as principais dimensões referentes aos indicadores de operações de logística reversa, com a sua aplicabilidade para o monitoramento e tomada de decisão estratégica.

Quadro 4 – Principais dimensões dos indicadores em logística reversa

Dimensão	Descrição e Importância	Referências
Ambiental	Corresponde ao ponto de vista ecológico das operações de retorno dos produtos à SC, considerando eficiência no uso de recursos, redução de resíduos destinados a aterros e minimização das emissões de gases de efeito estufa. A gestão adequada desses aspectos reduz riscos regulatórios, melhora a imagem institucional e reforça a responsabilidade ambiental da empresa.	Kazançoğlu <i>et al.</i> (2020), Ahlström <i>et al.</i> (2020), Wibowo <i>et al.</i> (2022), Beiler <i>et al.</i> (2020)
Operacional	Refere-se à eficiência dos processos de coleta, transporte, triagem, remanufatura e gestão de estoques na logística reversa. Um desempenho operacional eficaz reduz custos, aumenta a agilidade no fluxo reverso e garante maior confiabilidade, impactando diretamente na satisfação do cliente e na competitividade da empresa.	Chaves, Giuriatto e Ferreira (2020), Ahlström <i>et al.</i> (2020), Adesoga <i>et al.</i> (2024) Dabees, Barakat e Lisek (2023)
Financeira	Engloba a análise de custos, economias geradas e retorno financeiro com materiais recuperados. Essa dimensão é essencial para a sustentabilidade econômica das operações, pois demonstra a viabilidade do sistema reverso e contribui para a lucratividade e a proteção da margem financeira.	Chaves, Giuriatto e Ferreira (2020), Beiler <i>et al.</i> (2020), Kazançoğlu <i>et al.</i> (2020)
Social	Considera os impactos sociais, como geração de empregos, engajamento de stakeholders, conformidade com os contratos e satisfação dos consumidores. A relevância está em fortalecer o capital social da empresa e melhorar sua imagem perante a sociedade.	Beiler <i>et al.</i> (2020), Chaves, Giuriatto e Ferreira (2020)
Institucional e Legal	Diz respeito ao atendimento às regulamentações ambientais, políticas públicas e cláusulas contratuais. Essa dimensão assegura a conformidade legal, evita penalidades e promove maior credibilidade institucional junto a órgãos reguladores e investidores.	Wibowo <i>et al.</i> (2022), Chaves, Giuriatto e Ferreira (2020)

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 4 demonstra que os indicadores quando aplicados à logística reversa não podem ser restritos a apenas uma perspectiva, devendo contemplar aspectos ambientais, operacionais, econômicos, sociais e legais. Essa diversidade de dimensões reforça a necessidade de abordagens integradas, capazes de capturar os diferentes impactos do processo de fluxo reverso de materiais.

Assim, ainda que a literatura forneça uma base ampla de indicadores, a aplicabilidade de cada métrica depende diretamente do contexto organizacional, das características

do fluxo e dos objetivos estratégicos da empresa (Werner *et al.*, 2020). No caso da logística reversa, em especial os inversores fotovoltaicos, é necessário priorizar indicadores que aliem eficiência operacional e redução do impacto socioambiental, de modo a fornecer informações úteis para a tomada de decisão e para o cumprimento de metas de sustentabilidade específicos para esse tipo de produto.

Observa-se que alguns dos indicadores listados nos tópicos anteriores apresentam sobreposição ou baixa relevância prática para a mensuração de desempenho do produto estudado. Para Radzinski *et al.* (2025), ainda há uma lacuna na padronização e aplicação de indicadores em cadeias de suprimento sustentáveis. Considerando o crescimento da geração solar no Brasil, o consequente aumento no número de inversores fotovoltaicos em circulação e as diretrizes da PNRS relacionadas à responsabilidade ambiental, torna-se necessário refletir sobre o destino desses equipamentos ao fim de sua vida útil. Nesse contexto, os indicadores viabilizam o controle das operações de logística reversa de inversores fotovoltaicos, fornecendo informações essenciais para a assertividade na tomada de decisão.

Assim, o aprofundamento teórico realizado neste capítulo possibilitou identificar lacunas e oportunidades na aplicação de indicadores voltados à sustentabilidade e à eficiência operacional da logística reversa de inversores fotovoltaicos. Essas informações serviram de base para a análise que será apresentada no capítulo de Resultados e Discussões. Entretanto, antes serão descritos os procedimentos metodológicos adotados na condução deste trabalho.

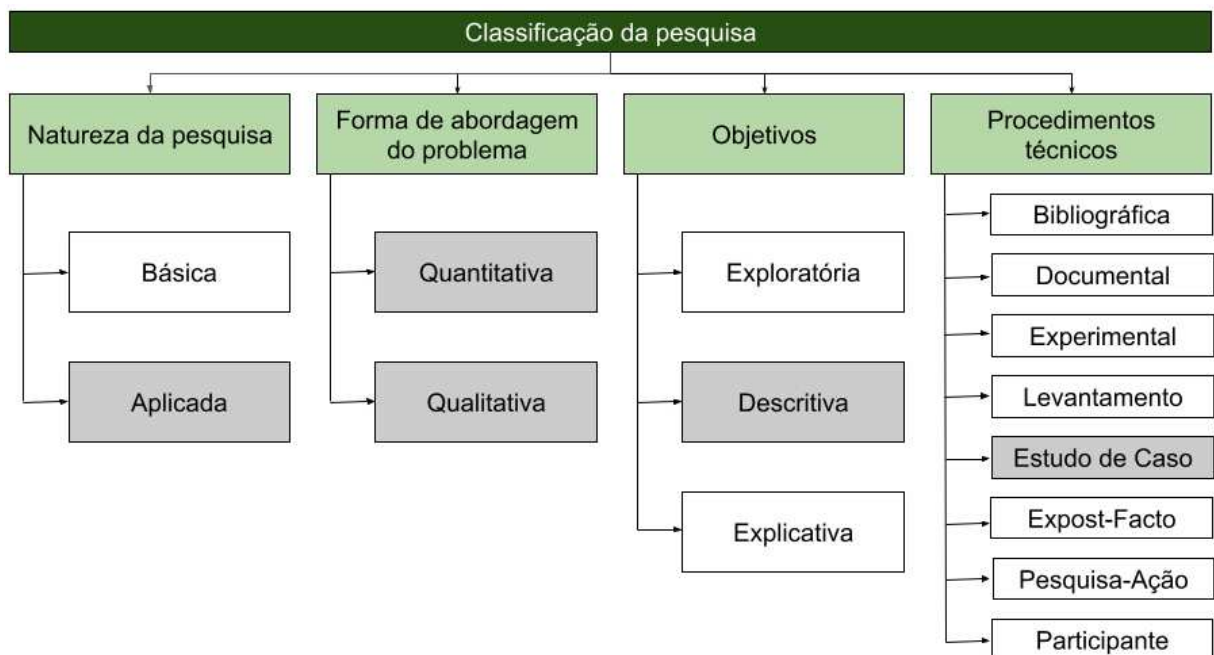
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos que conduziram da pesquisa, desde a definição de sua natureza até a descrição das etapas empregadas para atingir os objetivos propostos. São abordados o tipo de pesquisa, a estratégia de investigação adotada, bem como as técnicas utilizadas para coleta, análise e validação dos dados.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A classificação da pesquisa mostra de que forma serão buscadas as respostas para as perguntas formuladas. Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa é definida como um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é conduzida quando se tem um problema e faltam informações para resolvê-lo (Silva; Menezes, 2005). A Figura 5 esquematiza essas classificações.

Figura 5 – Classificações de Pesquisa



Fonte: Adaptado de Silva e Menezes (2005, pp. 20–22)

Assim, de acordo com a Figura 5, a classificação da pesquisa quanto à natureza do problema abordado é aplicada. Pois o estudo foi conduzido em uma organização real, visando aplicação prática além de contribuição à comunidade científica (Silva; Menezes, 2005).

No que se refere à abordagem metodológica, que define as formas de coleta, classificação e análise das informações da pesquisa, o estudo apresenta-se como qualitativo e

quantitativo, ou seja, de abordagem mista (Bogdan; Biken, 2003). A dimensão qualitativa manifesta-se na análise descritiva das informações coletadas, considerando a perspectiva e interpretação da pesquisadora. Já a abordagem quantitativa apareceu na mensuração dos indicadores e utilização de ferramentas estatísticas para interpretar os dados.

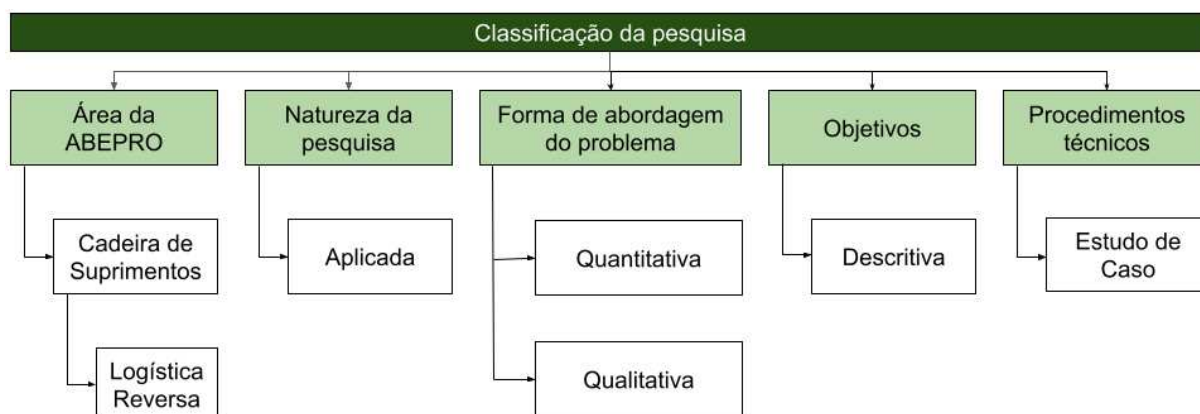
No que diz respeito ao objetivo, esta pesquisa é classificada como descritiva, pois tem como propósito principal descrever os fenômenos observados, bem como identificar e analisar os indicadores utilizados no contexto estudado. Diferentemente das pesquisas exploratórias e explicativas, a pesquisa descritiva busca registrar, analisar e correlacionar variáveis sem, necessariamente, investigar em profundidade as causas que lhes dão origem (Bogdan; Biken, 2003). Para atingir esses objetivos, serão utilizados procedimentos técnicos padronizados.

Segundo levantamento realizado por Miguel e Sousa (2012), o estudo de caso é um dos métodos mais utilizados em pesquisas na área de Engenharia de Produção. Esse método consiste na investigação detalhada de um ou mais objetos de estudo em seu contexto real, permitindo uma compreensão aprofundada de fenômenos complexos. Para sua condução, exige-se o uso de ferramentas de coleta e análise de dados, além de interação entre o pesquisador e o ambiente investigado.

Neste trabalho, optou-se pelo estudo de caso como procedimento técnico, uma vez que foi selecionada uma empresa como objeto de pesquisa, sem que houvesse intervenção direta sobre ela durante o desenvolvimento do estudo. Assim, a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso foi conduzida por meio de uma análise aprofundada dos objetivos propostos, tendo como referência a realidade de uma organização do setor de eletroeletrônicos. Dessa forma, busca-se compreender em detalhes os processos e indicadores adotados pela empresa, relacionando a teoria apresentada na literatura com a prática observada no contexto organizacional estudado (Miguel; Sousa, 2012).

De acordo com a classificação da ABEPRO, este trabalho se enquadra na área de "Cadeia de Suprimentos", pois discute questões relacionadas ao controle do fluxo de produtos e informações entre os elos da cadeia de suprimentos, com o objetivo de garantir o nível de serviço desejado e minimizar custos. Além disso, por focar na análise desse fluxo no sentido inverso, ou seja, do cliente final ao fornecedor inicial, a subárea específica deste estudo é "Logística Reversa", como mostra a Figura 6 (Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2023).

Figura 6 – Classificação da Pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico foi estruturado em três macro etapas: revisão bibliográfica, desenvolvimento do estudo de caso e construção da proposta. No Quadro 5 essas etapas são relacionadas aos objetivos específicos, as ferramentas utilizadas e os resultados encontrados do presente estudo.

Quadro 5 – Etapas da pesquisa

Etapas	Objetivos específicos	Ferramenta ou Método	Resultados encontrados
Revisão bibliográfica	Levantar na literatura as abordagens de indicadores aplicados à logística reversa, com foco em inversores fotovoltaicos	Bases de dados Scopus, Scielo, Google Scholar, repositório da UFSC, anais da ENEGEP e legislação brasileira	Quadro com os principais indicadores de logística reversa descritos na literatura
Desenvolvimento do estudo de caso	Mapear as práticas atuais de logística reversa de inversores fotovoltaicos em uma empresa do setor de tecnologia na região da Grande Florianópolis (SC)	Entrevistas semiestruturadas; Observação direta; Análise documental	Fluxograma dos processos de logística reversa; Quadro dos indicadores em uso com a forma de acompanhamento
Construção da proposta	Elaborar uma proposta de indicadores de logística reversa de inversores fotovoltaicos aplicáveis à empresa estudada	Análise comparativa entre teoria e prática; Método Delphi com especialistas da empresa e acadêmicos da área	Conjunto de indicadores para operações de logística reversa de inversores fotovoltaicos

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 5 apresenta de forma simplificada as etapas. Nos subtópicos a seguir, são discutidas e detalhadas as etapas da pesquisa.

3.2.1 Etapa 1: Análise da literatura dos indicadores aplicados na logística reversa para inversores fotovoltaicos

A primeira macroetapa consistiu na revisão da literatura, na qual primeiramente foram definidas as *strings* de busca fundamentais para compreender os conceitos centrais do estudo — logística, logística reversa, indicadores, energia solar fotovoltaica, inversores fotovoltaicos, regulamentações ambientais e legais vigentes. Essa etapa teve como objetivo identificar os principais conceitos e abordagens já discutidos na literatura, de forma a

embasar teoricamente a análise do estudo de caso, conforme apresentado no Quadro 6.

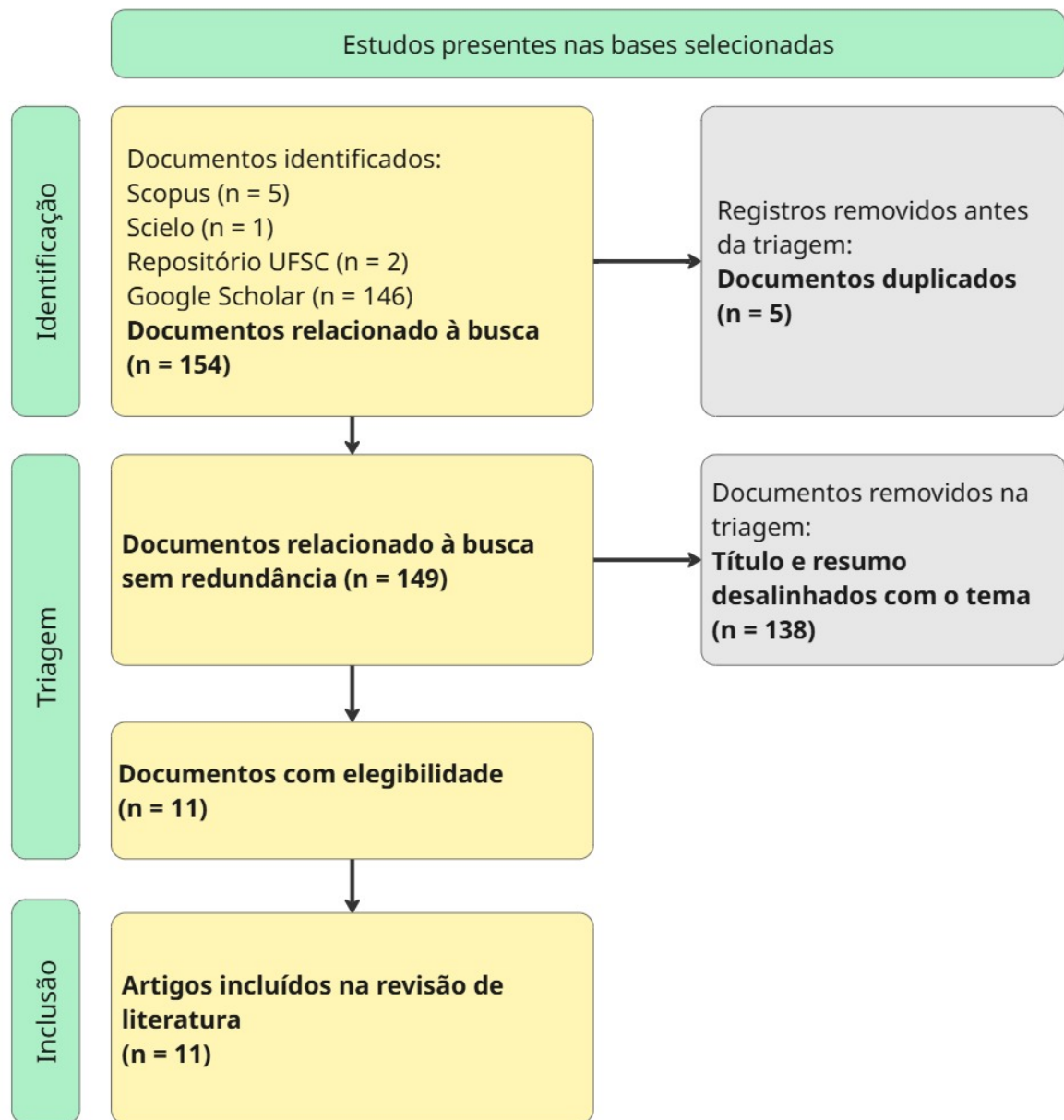
Quadro 6 – Strings de busca

Nº	Eixos conceituais	Strings utilizadas
1	Logística reversa e regulamentações	“Reverse logistics” OR “PNRS” OR “Environmental regulation”
2	Indicadores de desempenho	“Performance indicators” OR “KPI” OR “Indicadores de desempenho”
3	Energia solar e inversores fotovoltaica	“Solar energy” OR “Photovoltaic inverters”

Fonte: Elaboração própria.

Com as *strings* definidas, as principais bases de dados eletrônicas foram consultadas, entre elas Scopus, Scielo, Google Scholar, Repositório da UFSC e anais da ENEGEP, no mês de agosto de 2025. Para essa revisão bibliográfica adaptou-se a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), originalmente desenvolvida para orientar a condução e o relato de revisões sistemáticas e meta-análises de forma transparente e rigorosa (Page *et al.*, 2020). Essa abordagem permite estruturar a revisão da literatura de maneira objetiva e organizada, dividindo o processo em quatro etapas principais: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama PRISMA dos procedimentos dessa pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

Na fase de identificação, foram localizados 154 estudos, sendo 5 na base Scopus, 1 na SciELO, 2 no repositório da UFSC e 146 no Google Scholar. Em seguida, na etapa de triagem, foram excluídos 5 estudos por duplicidade e 138 por apresentarem título e resumo desalinhados com o tema da pesquisa. Restaram 11 estudos para leitura na íntegra, dos quais 9 eram empíricos e 2 teóricos, todos atendendo aos critérios de elegibilidade com acesso gratuito. Assim, os 11 estudos, que se encontram referenciados no Quadro 8, foram incluídos na revisão final conforme ilustrado no fluxograma da Figura 7.

A partir da leitura integral do material foram identificados os indicadores citados, que são relacionados à logística reversa, em especial no contexto de equipamentos eletroeletrônicos como os inversores fotovoltaicos. A seguir, apresenta-se o processo de desenvolvimento do estudo.

3.2.2 Etapa 2: Mapeamento das práticas de logística reversa de inversores fotovoltaicos na região da Grande Florianópolis - Estudo de Caso no setor de tecnologia

Na segunda macroetapa, fez-se o desenvolvimento do estudo de caso, no qual os fatores identificados durante a revisão bibliográfica foram investigados na amostra escolhida: o setor de logística reversa de inversores de uma empresa de grande porte do segmento de eletroeletrônicos situada na região da Grande Florianópolis-SC.

Nessa fase, inicialmente buscou-se conhecer os processos de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa, para em seguida identificar os indicadores atualmente utilizados pela organização, de modo a compreender como o acompanhamento da produtividade é realizado. Para isso, elaborou-se um roteiro de entrevista semiestruturada, presente no Apêndice A com base em perguntas feitas em estudos similares (Lima, B. C., 2019; Rodrigues, 2007; Galhardi, 2023; Franzini *et al.*, 2019).

As perguntas foram respondidas pelo engenheiro de produção responsável pelo setor de logística reversa de inversores, profissional que atua à 18 anos diretamente na gestão operacional e no acompanhamento dos processos produtivos de eletroeletrônicos da empresa. Além disso, a análise documental de instruções de trabalho e planilha de metas do setor possibilitou uma compreensão mais detalhada sobre os indicadores em uso, porém se tratam de dados sigilosos e por isso não serão divulgadas neste trabalho seguindo os termos do documento assinado pela empresa e pela autora.

Como resultado desta etapa, obteve-se um fluxograma representativo dos processos de logística reversa da empresa, bem como um quadro com os indicadores utilizados, detalhando sua forma de acompanhamento na organização.

3.2.3 Etapa 3: Construção da Proposta de Indicadores de Logística Reversa de Inversores Fotovoltaicos para a empresa

A terceira macro etapa correspondeu à construção da proposta de indicadores, fundamentada nos resultados obtidos nas fases anteriores. Os indicadores levantados na revisão bibliográfica, em conjunto com os dados coletados na empresa, foram consolidados com o objetivo de elaborar um instrumento de pesquisa abrangente e não redundante. Esse instrumento constituiu a base para a avaliação da aplicabilidade e do grau de importância de cada indicador no contexto da logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa analisada, feita por meio do método Delphi.

O método Delphi é caracterizado por rodadas iterativas de coleta de opiniões de especialistas, com a finalidade de obter um consenso sem a influência de dinâmicas de grupo, como dominância de opinião ou pressão social (Dalkey, 1969). As suas características principais são anonimato, iteração, feedback controlado e resposta de grupo (Schmalz; Spinler; Ringbeck, 2020). O método inicia com a definição dos itens para os questionários Delphi, que geralmente são retirados da literatura relevante ao assunto ou coletados durante entrevistas ou grupos focais realizados com antecedência (Niederberger; Spranger, 2020).

Com base nos indicadores identificados na literatura que apresentam relação com a logística reversa de inversores fotovoltaicos, junto aos indicadores já utilizados nesse setor da empresa, elaborou-se um questionário no Google Forms, disponível no Apêndice B, para ser respondido pelos especialistas selecionados e acadêmicos da área. O objetivo foi que esses profissionais atribuísem um grau de relevância dos indicadores em suas atividades cotidianas. Para isso, adotou-se uma escala Likert, variando de 1 (sem importância) a 5 (imprescindível) (Joshi *et al.*, 2015).

A escala Likert é um instrumento reconhecido pela sua eficácia para mensurar percepções em pesquisas aplicadas (Koo; Yang, 2025). Sua principal contribuição está em transformar respostas subjetivas em dados quantitativos, o que facilita a análise estatística e comparativa entre diferentes respondentes (Tutz, 2020). No contexto desse trabalho, a escala permitiu que os especialistas expressassem o grau de relevância que atribuem a cada indicador, desde “sem importância” até “imprescindível” (Lima, B. C., 2019).

No entanto, alguns cuidados são necessários: definir adequadamente o número de pontos da escala, grupo heterogêneo de participantes, evitar viés de resposta por meio de uma formulação equilibrada dos itens e interpretar os resultados considerando a natureza dos dados coletados (Jebb; Ng; Tay, 2021; Tutz, 2020). Dessa forma, a escala representada no Quadro 7 foi utilizada para quantificar a percepção dos profissionais em relação aos indicadores da logística reversa de inversores fotovoltaicos (South *et al.*, 2022).

Quadro 7 – Escala Likert utilizada para avaliação dos indicadores

Valor	1	2	3	4	5
Descrição	Sem importância	Pouco importante	Importância moderada	Importante	Imprescindível

Fonte: Elaboração própria.

Nesse contexto, a escala Likert apresentada no Quadro 7 foi incorporada aos questionários do método Delphi do Apêndice B, a serem aplicados em sucessivas rodadas até que se alcançasse o consenso entre os especialistas. O objetivo desse procedimento foi identificar e priorizar os indicadores mais adequados à logística reversa de inversores.

Segundo Giannarou e Zervas (2014), não há um valor único estabelecido para definir o consenso, tampouco para determinar o número de rodadas necessárias na aplicação do método Delphi. Os critérios devem ser estabelecidos no início da pesquisa, de acordo com seus objetivos e especificidades. O número de rodadas usualmente varia de duas a quatro (Dalkey, 1969). Giannarou e Zervas (2014), Miller (2001), Rayens e Hahn (2000) e Christie e Barela (2005) em seus estudos utilizaram a escala Likert de 1 a 5 para avaliar a importância dos indicadores, o consenso e elegibilidade foi mensurado pela combinação de duas medidas:

- a) mais de 50 % dos especialistas atribuíram notas 4 ou 5;
- b) desvio padrão inferior a 1,5.

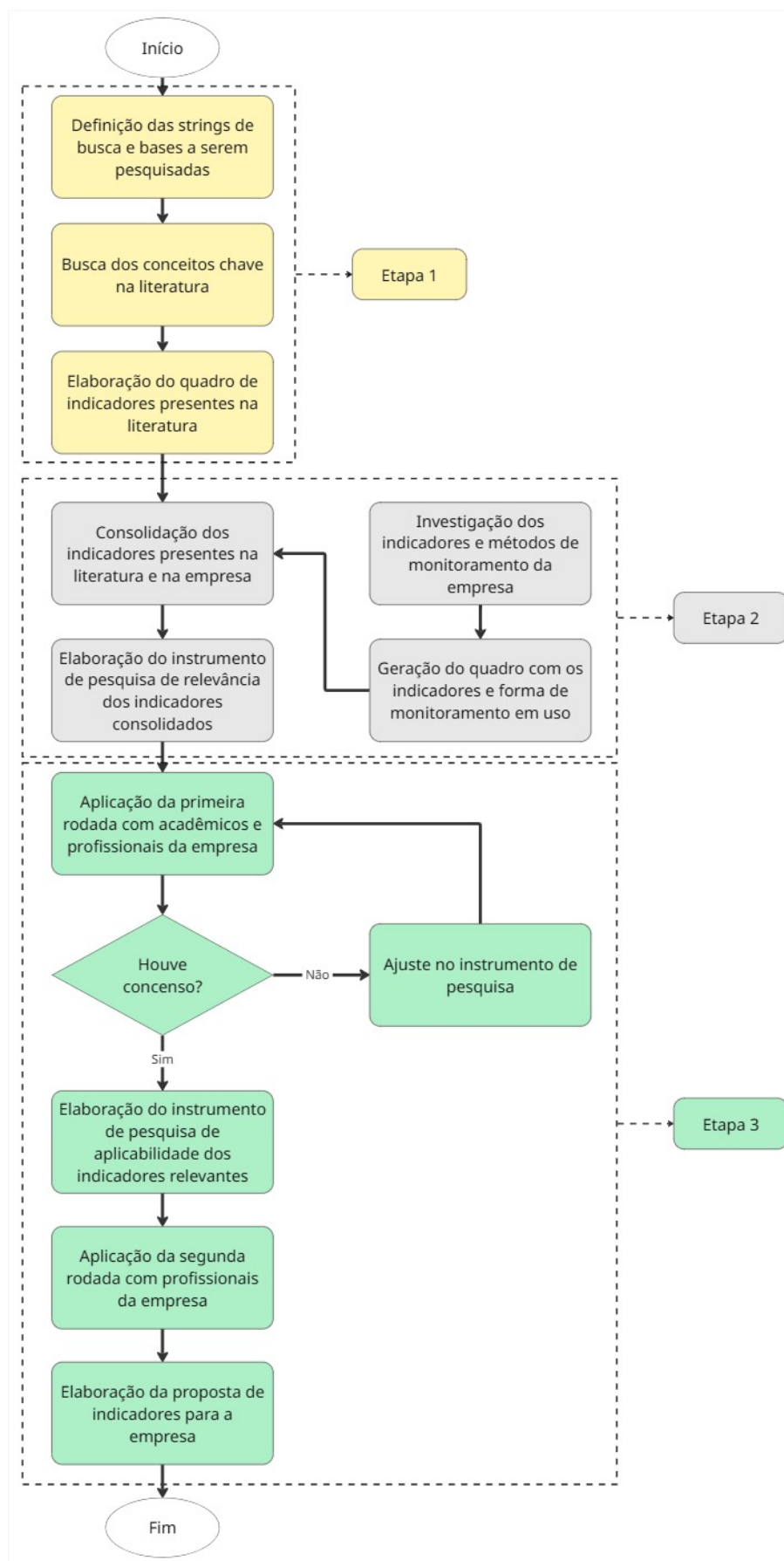
A primeira medida permite avaliar a dispersão das respostas, refletindo o nível de concordância entre os participantes, enquanto a segunda está associada à relevância e elegibilidade do indicador. Além disso, a mediana também será utilizada como medida de tendência central, por representar a opinião do grupo em escalas ordinais e por ser menos sensível a valores extremos, o que a torna mais apropriada do que a média para o contexto do método Delphi (Silvestre, 2023).

O grupo de especialistas para o presente estudo são os colaboradores que atuam com a logística reversa de inversores da empresa e os acadêmicos da área de logística reversa. O tamanho recomendado da amostra dos participantes não possui uma regra fixa porém os estudos costumam variar entre 7 a 30 participantes, sendo que próximo de 20 tende a ter menor taxa de evasão e já produzir resultados suficientes (Armstrong, 1985; Dalkey, 1969; Mullen, 2003; Giannarou; Zervas, 2014).

Na primeira rodada, os especialistas avaliaram a relevância dos indicadores identificados na literatura, complementados por aqueles já utilizados pela empresa. Em seguida, os resultados foram consolidados e submetidos a uma segunda rodada, apenas com os profissionais da organização. Esses participantes responderam a um novo formulário do Google Forms, disponível no Apêndice C, que apresentava a fórmula de cálculo de cada indicador, possibilitando-lhes avaliar a aplicabilidade à realidade da empresa, nas categorias “Sim”, “Parcialmente” ou “Não”.

Como resultado do método obteve-se um conjunto de indicadores relevantes, aplicáveis à realidade da empresa estudada e validados pelos acadêmicos. Esse resultado constitui a proposta final do conjunto de indicadores em logística reversa de inversores fotovoltaicos, oferecendo uma opção de controle para a sustentabilidade e eficiência operacional da organização.

Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos dessa pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 8 apresenta esquematicamente as três macroetapas da pesquisa: revisão bibliográfica, desenvolvimento do estudo de caso e construção da proposta. O fluxograma permite visualizar como cada etapa se conecta e quais atividades foram realizadas em paralelo ou em sequência, evidenciando a lógica metodológica adotada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados das três etapas do trabalho. Na Etapa 1, são sintetizados os indicadores de logística reversa identificados na literatura por meio do método PRISMA; na Etapa 2, analisa-se o objeto de pesquisa do estudo de caso, mapeando as práticas e os indicadores atualmente utilizados; e, por fim, na Etapa 3, integra-se teoria e prática por meio do método Delphi, construindo a proposta de indicadores de logística reversa para a empresa a partir da avaliação dos profissionais da organização e por acadêmicos, classificando-os quanto à sua aplicabilidade.

4.1 ETAPA 1: ANÁLISE DA LITERATURA DOS INDICADORES APLICADOS NA LOGÍSTICA REVERSA PARA INVERSORES FOTOVOLTAICOS

O método PRISMA aplicado nesta pesquisa possibilitou a identificação inicial de um conjunto amplo de estudos, os quais foram filtrados de acordo com critérios de inclusão e exclusão do modelo, descritos na Figura 7. Ao final do método, foram selecionados 11 documentos relacionados à logística reversa de inversores fotovoltaicos. Além da análise desses trabalhos, também foi considerada a literatura cinzenta. Com o intuito de facilitar a identificação dos documentos nas etapas subsequentes de análise, eles foram organizados e enumerados no Quadro 8.

Quadro 8 – Documentos incluídos na análise

Nº	Autor	Título
1	(Silva, 2021)	Avaliação de Desempenho e Transação de Energia Elétrica numa Comunidade de Energia Baseada em Produção Solar Fotovoltaica
2	(Radzinski <i>et al.</i> , 2025)	Performance Indicators of Reverse Logistics Systems: A Proposal For A Model Applied to the Brazilian Context
3	(Gervais <i>et al.</i> , 2022)	Sustainability, Criticality, and Circularity in PV: Using SDG 12 as a Lens to Map Sectoral Gaps
4	(Becerra-Fernandez; Sarmiento; Cardenas, 2023)	Sustainability assessment of the solar energy supply chain in Colombia
5	(Israel, 2024)	A decision support model to perform sustainable choices concerning the selection of material suppliers in the solar energy industry
6	(Adriano, 2015)	Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal
7	(de Avila Sbampato, 2017)	Comparative analysis between mono-Si and OPV photovoltaic devices: accelerated aging experiments applied to LCA and LCOE
8	(de Almeida Xavier, 2024)	Tecnologias de Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos
9	(Rodrigues, 2007)	Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil
10	(Fernandes, 2017)	Gestão da Logística Inversa na Construção Civil e Obras Públicas
11	(Franzini <i>et al.</i> , 2019)	Impacto e destinação dos celulares retornados ao fabricante, no mercado brasileiro

Fonte: Elaboração própria.

A listagem dos autores no Quadro 8 contribuiu para referenciar os estudos nas etapas subsequentes. A partir da inclusão dos 11 documentos selecionados, levantou-se as perspectivas e ênfases temáticas presentes nesses trabalhos. Para isso, as palavras-chave foram extraídas e organizadas conforme sua frequência de ocorrência, apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Frequência de palavras-chave

Palavra-chave	Frequência
Sustentabilidade	5
Logística reversa	4
Fotovoltaico	4
Resíduos	4
Tomada de decisão	3
Energia solar	2
Reciclagem	2
Indicadores de desempenho	2
Produtos pós-consumo	2
Cadeia de suprimentos	2
Gap analysis	1
Nível de maturidade	1
Roteiro	1
Metas de desenvolvimento sustentável	1
Tecnologia Ecoblok	1
Impacto ambiental	1
Fim de vida	1
Economia verde	1
Colômbia	1
Estudo de caso	1
Dinâmica de sistemas	1
Remanufatura	1
Retorno de produto	1
Smart grids	1
Prosumidor	1
Comunidade de energia	1
Stakeholder	1
Modelo genérico	1
Custo nivelado de energia	1
Teste de envelhecimento acelerado	1
Seleção de fornecedores	1

Fonte: Elaboração própria.

A identificação da frequência das palavras-chave permite compreender quais temas têm recebido maior atenção nas pesquisas relacionadas à logística reversa de inversores fotovoltaicos, revelando as tendências e lacunas existentes na literatura. O destaque para o termo “Sustentabilidade”, presente em 5 dos 11 documentos, demonstra que os estudos priorizam a dimensão ambiental como eixo central de análise. Em seguida, apareceram os termos “Logística reversa”, “Fotovoltaico” e “Resíduos”, cada um mencionado em 4 documentos confirma a pertinência do recorte temático adotado neste trabalho. Na sequência, o termo “Tomada de decisão” apareceu 3 vezes, enquanto “Energia solar”, “Reciclagem”, “Indicadores de desempenho”, “Produtos pós-consumo” e “Cadeia de suprimentos” foram mencionados em 2 documentos cada, demonstrando coerência com os eixos conceituais

que sustentam este estudo.

Já os demais termos ocorreram apenas uma vez entre os estudos analisados. Essa diversidade evidencia a amplitude e a heterogeneidade dos estudos analisados, mostrando que, embora exista um núcleo temático consolidado, voltado à sustentabilidade e à logística reversa, há dispersão conceitual em torno de outros temas complementares, como análise de maturidade, remanufatura e seleção de fornecedores. Essa variedade sugere que essas abordagens ainda são emergentes ou pouco exploradas na literatura, apontando oportunidades de aprofundamento para futuras pesquisas sobre indicadores da logística reversa de inversores fotovoltaicos.

A análise das palavras chave dos documentos incluídos se relacionam de forma consistente com o objetivo desta etapa, que busca identificar, na literatura, indicadores aplicáveis à logística reversa de inversores fotovoltaicos. Por fim, foram mapeados os indicadores abordados em cada artigo. Esses indicadores refletem as métricas utilizadas nos estudos relacionados à logística reversa de inversores fotovoltaicos, mostrando como o desempenho pode ser mensurado nesse contexto. O Quadro 10 apresenta a consolidação desses indicadores, acompanhada da respectiva referência de cada estudo analisado.

Quadro 10 – Indicadores de logística reversa de inversores fotovoltaicos descritos na literatura

indicadores	Autor
Eficiência; Meio ambiente; Confiabilidade; Qualidade de energia; Segurança; Redução de custos	1
% de retorno nas vendas totais; toneladas de resíduos pós-consumo por ano; destinação final por tipo de tecnologia; % de materiais destinados; destino-alvo; custo do material retornado versus custo logístico de entrega; toneladas de material com descarte ambientalmente correto; % de quantidade retornada versus quantidade vendida; % de materiais reciclados em unidades; % de materiais retornados reaproveitados em unidades; qualidade do serviço; taxa de geração de resíduos; valor pago em multas; custos da logística reversa; custos administrativos da logística reversa; custo de produtos deteriorados; número de veículos de coleta danificados; % de materiais danificados; % de outros resíduos presentes nos materiais retornados; eficiência operacional; valor recuperado por reprocessamento e revenda de produtos; % de materiais ambientalmente corretos utilizados; redução das emissões de gases poluentes; apoio ao desenvolvimento de fornecedores; taxa de acidentes de trabalho.	2
Consumo de energia/MW; consumo de água/MW; resíduos gerados e reciclados.	3
Demanda Atendida por Energia Solar; Redução de Emissões; Indicador de Diversificação; Empregos Criados	4
Econômicos: custo, CapEx, eficiência operacional, estabilidade financeira, flexibilidade contratual, cronograma de entrega. Sociais: conformidade regulatória, especificações técnicas, requisitos de conteúdo local, relações comunitárias, saúde e segurança e trabalho. Ambientais: impactos ambientais, certificações, restrições de engenharia, eficiência de recursos, circularidade	5
Extração de água; Extração de recursos; Uso do solo; Emissão de gases de efeito estufa; Poluição do ar; Poluição da água/solo; Dioxinas e furanos	6
Demanda cumulativa de energia; Tempo de retorno de energia; Potencial de aquecimento global; Potencial de acidificação; Potencial de Depleção de Metal; Potencial de eutrofização; Potencial de ecotoxicidade aquática marinha; Toxicidade humana; Custo nivelado da eletricidade	7, 8 e 9
Taxa de coleta de REE; taxa de reciclagem; custos logísticos; n° pontos de coleta	10
Taxa de reaproveitamento; taxa de descarte; receita anual; lucro/margem; taxa de retorno por canal; n° empregos gerados	11

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, os indicadores identificados no Quadro 10 foram reorganizados com base nas mesmas dimensões estabelecidas no Quadro 4 do Capítulo 2.1.3, buscando garantir alinhamento conceitual. Além disso, os indicadores similares foram padronizados com o nome mais abrangente, com isso as duplicidades foram removidas. Indicadores considerados fora do escopo foram desconsiderados. O Quadro 11 apresenta o resultado desse agrupamento, acompanhado da descrição de cada indicador com os respectivos autores que os propuseram.

Quadro 11 – indicadores de logística reversa de inversores consolidados por dimensão

Dimensão	Indicador padronizado	Explicação	Autor
Financeira	Custos totais de logística reversa	Soma dos custos de coleta, transporte, processamento e administrativos.	2, 10, 11
	Multas e perdas	Impacto financeiro de multas, produtos danificados ou obsoletos.	2
	Retorno financeiro	Valor recuperado por remanufatura ou revenda de equipamentos/peças.	2, 11
	Estabilidade financeira	Capacidade de manter equilíbrio econômico diante dos investimentos e riscos.	5
	Custo da eletricidade	Custo para geração de energia ao longo do ciclo de vida do produto.	7, 8, 9
Operacional	Eficiência operacional	Produtividade do processo de logística reversa.	1, 2, 5
	Taxa de retorno	Percentual de produtos retornados em relação às vendas.	2
	Infraestrutura de coleta	Número de veículos e pontos de coleta disponíveis.	2, 10
	Taxa de retorno por canal	Quantidade de produtos retornados por cada canal em relação ao total vendido no canal.	11
	Qualidade do serviço	Quantidade que apresentam defeitos sobre o total remanufaturado.	2
Ambiental	Gestão de resíduos	Toneladas de resíduos coletados, destinados ou evitados.	2, 3
	Reciclagem e reaproveitamento	Percentual de materiais retornados que são reciclados ou reutilizados corretamente.	2
	Redução de emissões de gases de efeito estufa	Quantificação das emissões evitadas pelo sistema.	2, 4
	Impactos ambientais do ciclo de vida	Mede efeitos que contribuem para aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade.	6, 7, 8, 9
	Uso de recursos naturais	Consumo de água, solo, energia e matérias-primas.	3, 6
	Demanda atendida por energia solar	Contribuição da energia solar para a demanda total.	4
	Diversificação da energia	Grau de diversificação da matriz energética.	4
Legal	Conformidade regulatória	Atendimento a normas legais, certificações e especificações técnicas.	5
Social	Saúde	Avalia condições de trabalho, ergonomia e ginástica laboral.	5
	Segurança	Número de acidentes por homem-hora e condições de trabalho.	2, 5
	Responsabilidade social	Programas sociais, reputação e relações comunitárias.	2, 5
	Desenvolvimento humano	Número de capacitações e treinamento promovidos.	2, 5
	Satisfação dos clientes	Quantidade de opiniões negativas dos clientes (internos e externos).	2
	Empregos criados	Número de empregos diretos e indiretos gerados.	4, 11

Fonte: Elaboração própria.

Com base na consolidação dos indicadores de logística reversa de inversores fotovoltaicos presentes na literatura (Quadro 11), é possível observar um esforço para equilibrar as métricas entre as dimensões Financeira, Operacional e Ambiental, refletindo as três bases da sustentabilidade empresarial. A dimensão Operacional é a que apresenta o maior número de indicadores (sete no total), englobando métricas tradicionais da logística, como "Eficiência operacional", "Taxa de retorno" e "Infraestrutura de coleta". Isso sublinha a preocupação fundamental da literatura em medir a eficiência e a produtividade dos processos de coleta, triagem e remanufatura, visando a otimização do fluxo reverso.

Em seguida, a dimensão Ambiental também é robusta (oito indicadores), destacando a relevância de se medir o impacto ecológico, com ênfase em "Gestão de resíduos", "Reciclagem e reaproveitamento" e "Uso de recursos naturais". Essa forte presença ambiental reflete a pressão regulatória (PNRS) e a crescente conscientização, sendo a sustentabilidade o tema de maior frequência nas palavras-chave analisadas. Por sua vez, a dimensão Financeira apresenta cinco indicadores, como "Custos totais de logística reversa" e "Retorno financeiro", indicando que a viabilidade econômica é um pilar crucial, pois o sucesso da LR depende de sua capacidade de gerar valor ou mitigar perdas.

As dimensões Social (sete indicadores) e Legal (um indicador) estão presentes para complementar essa visão integrada, sendo essenciais para a legitimidade da operação, mas com uma representatividade menor de indicadores na literatura, sugerindo que a maior parte da pesquisa se concentra nos aspectos de custo, fluxo e impacto físico dos materiais.

A discussão geral da literatura mostra, portanto, que uma abordagem eficaz exige a avaliação simultânea desses múltiplos aspectos, e que a LR de inversores fotovoltaicos é vista como um sistema complexo que não pode ser reduzido a apenas uma métrica, como custo ou volume. Na etapa seguinte, a empresa foi estudada e seus indicadores foram integrados aos levantados no Quadro 11, constituindo o avanço necessário para a formulação da proposta na etapa final.

4.2 ETAPA 2: MAPEAMENTO DAS PRÁTICAS DE LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS NA REGIÃO DA GRANDE FLORIANÓPOLIS - ESTUDO DE CASO NO SETOR DE TECNOLOGIA

4.2.1 A Empresa

A empresa objeto deste estudo atua no mercado nacional de tecnologia há mais de 45 anos, contando atualmente com um quadro superior a 3 mil colaboradores. Com forte presença no mercado nacional, apresenta um portfólio diversificado de produtos e serviços, o que a torna altamente competitiva em seu segmento. Possui quatro unidades de produção, sendo uma delas localizada na Grande Florianópolis (SC), a qual foi o foco desta pesquisa.

De acordo com a classificação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), trata-se de uma empresa de grande porte e de capital aberto, com ações negociadas na B3 (ANVISA, 2019). No que se refere à logística reversa, a organização dispõe de um setor para essa atividade, incluindo uma área dedicada aos inversores fotovoltaicos.

4.2.2 A Área de Logística Reversa de Inversores

O setor de logística reversa da empresa é responsável pelo tratamento dos equipamentos que retornam do campo, seja em situações de pós-venda ou de pós-consumo. Alinhado ao compromisso ambiental da organização e ao cumprimento da garantia dada aos clientes, esse setor reintegra os equipamentos à cadeia produtiva, seja agregando valor novamente ou garantindo a destinação adequada dos resíduos à reciclagem.

Esse setor se destaca ainda pela complexidade de lidar com todo o portfólio da empresa, abrangendo desde itens pequenos e simples, como lâmpadas, até equipamentos pesados e tecnologicamente avançados, como inversores fotovoltaicos. A subárea dedicada à logística reversa de inversores fotovoltaicos conta com uma equipe composta por 4 técnicos especializados, 1 assistente, 1 conferente de estoque, 1 estagiário, 2 líderes, além de aproximadamente 4 analistas administrativos com formação multidisciplinar, assegurando a produtividade e a coordenação do processo.

Os principais processos realizados incluem: recebimento, triagem, lançamento fiscal, limpeza, reparo técnico, testes, expedição e reciclagem. Esses procedimentos permitem o reaproveitamento dos produtos, ao mesmo tempo em que reduzem os impactos ambientais. Os fornecedores envolvidos no fluxo da remanufatura vão além dos tradicionais de matéria-prima, abrangendo distribuidores, varejistas, assistências técnicas e clientes finais de e-commerce.

Após os processos de remanufatura, os equipamentos podem seguir três destinos distintos:

- a) **Sucata:** encaminhada a empresas especializadas em reciclagem de produtos eletrônicos;
- b) **Pecas de reposição:** armazenadas em estoque para uso posterior ou enviadas diretamente para assistência técnica, conforme definição do setor de Programação e Controle de Materiais (PCM);
- c) **Produtos remanufaturados:** comercializados em canais específicos, destinados a colaboradores ou a provedores que adquirem grandes volumes mediante acordos comerciais.

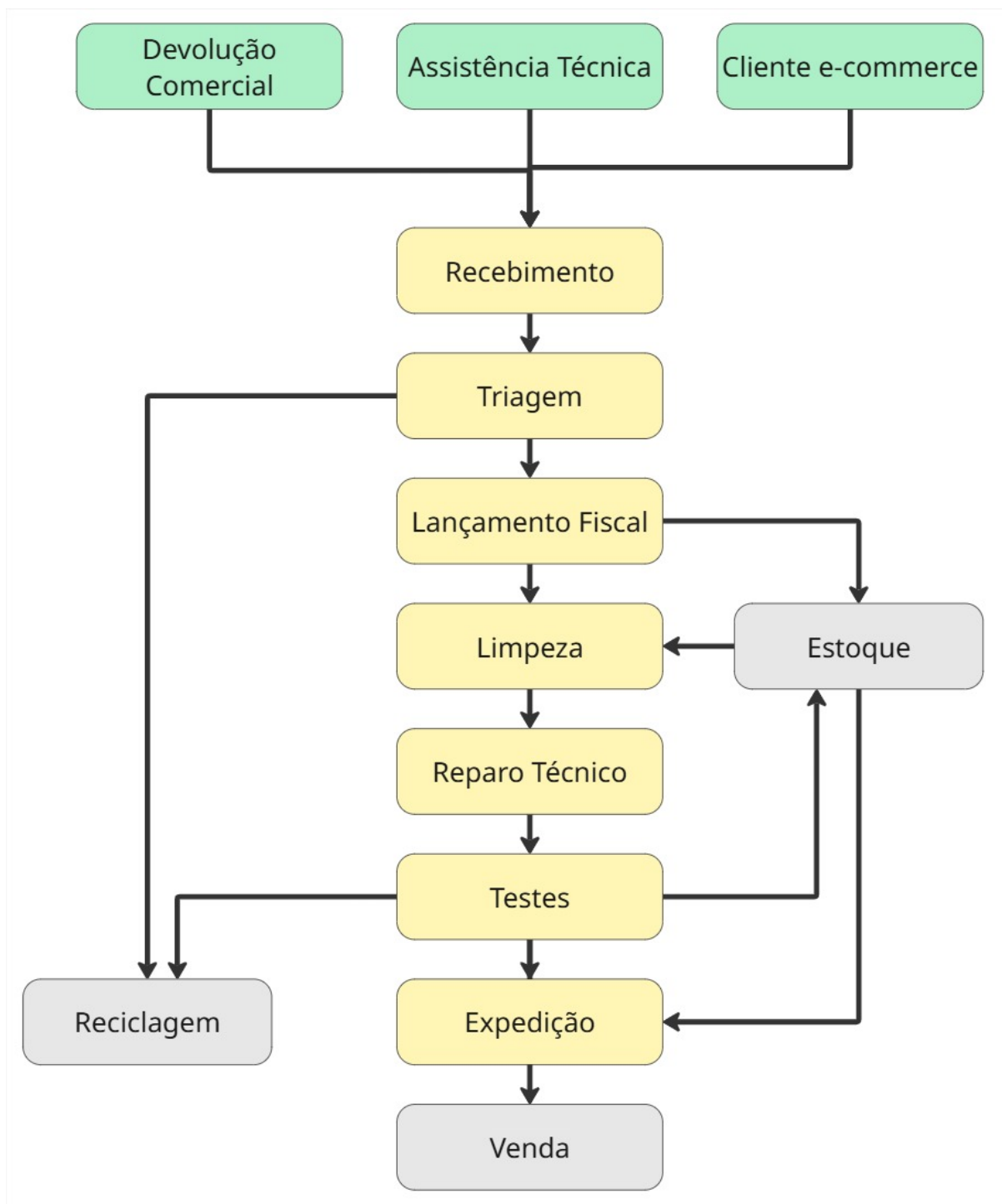
Além do reaproveitamento de produtos e da destinação correta da sucata, o setor desempenha papel estratégico na geração de informações sobre falhas. Tais dados, devidamente padronizados e registrados no sistema interno, são repassados às áreas de Pesquisa & Desenvolvimento e Qualidade, subsidiando a melhoria contínua dos produtos.

A área de logística reversa de inversores é responsável também pelo cumprimento das garantias oferecidas pela empresa, que possuem vigência de até 10 anos. Em casos de falha ou defeito, o inversor é prontamente substituído, uma vez que a interrupção de um sistema de geração solar representa prejuízos significativos, dada a magnitude do investimento realizado. Dessa forma, o setor assegura a continuidade operacional dos clientes e reforça a credibilidade da organização perante o mercado.

Os principais desafios mencionados estão relacionados à dificuldade de previsão da demanda, porque possuem dificuldade de determinar com precisão quantos inversores apresentarão defeitos nem em que intervalo de tempo. Mesmo com a análise de históricos, diferentes lotes podem apresentar comportamentos distintos. Além disso, fatores como condições climáticas, qualidade da instalação, mau uso e até eventos extremos — como as enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul em 2024 — influenciam diretamente no volume e condições em que os equipamentos retornarão. Devido à diversificação dos defeitos apresentados, a previsão de demanda das peças de substituição também é dificultada.

Outro desafio apontado refere-se ao peso dos equipamentos, que, diferentemente da maioria dos demais produtos comercializados pela empresa, não podem ser movimentados apenas com a força humana. Para sua manipulação, são necessários equipamentos de transporte e estações de trabalho adaptadas, incluindo o uso de cabos de aço para içamento dos inversores. Por fim, os processos de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa foram simplificados na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma simplificado dos processos de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa



Fonte: Elaboração própria.

Como representado na Figura 9, o processo inicia-se com a entrada do produto proveniente de diferentes origens: devoluções comerciais de distribuidores e varejistas, assistências técnicas ou clientes finais do e-commerce. Sendo esse último amparado pelo

direito legal de devolução de compras online, muitas vezes sem sequer terem utilizado o equipamento. Após a chegada, o produto passa pelo setor de recebimento, no qual é realizada a conferência das informações declaradas em relação ao item físico. Em seguida, ocorre a triagem, etapa na qual profissionais especializados avaliam se o produto possui condições de ser remanufaturado ou se deve ser destinado à reciclagem.

Quando identificado como passível de remanufatura, o produto segue para o lançamento fiscal, no qual a nota de devolução é registrada no sistema. A partir daí, pode ser encaminhado ao estoque pelo controlador de estoque – seja na forma de produto completo ou de peças de reposição – ou para a etapa de limpeza. Na limpeza, todas as partes do produto são limpas com produtos específicos, respeitando as particularidades de cada componente, especialmente os sistemas eletrônicos, que demandam maior cuidado.

Posteriormente, realiza-se o reparo técnico do inversor, acompanhado de testes de funcionamento em que suas condições de operação são simuladas. Essa etapa exige o controle de normas rigorosas de segurança, uma vez que o inversor fotovoltaico opera em baixa e média tensão, podendo resultar em acidentes elétricos. Durante esse processo, todas as funcionalidades do equipamento são verificadas, sendo as peças substituídas ou reparadas quando necessário, e o desempenho total validado. Caso o produto não apresente condições de operação, é destinado à reciclagem. Caso contrário, é classificado como remanufaturado, com a preservação de todas as funcionalidades do produto original. Os itens enviados à reciclagem são previamente descaracterizados e encaminhados a empresas especializadas nesse processo. Já os produtos remanufaturados retornam ao mercado por meio de canais de venda específicos.

A análise detalhada dos processos de Logística Reversa (LR) da empresa, sintetizados na Figura 9 revela uma operação complexa que engloba o ciclo completo de tratamento dos inversores: desde o recebimento de diferentes canais de retorno até a triagem, reparo/remanufatura e destinação final. Contudo, o monitoramento desse fluxo é severamente limitado pela adoção de apenas dois indicadores: "Giro de Estoque" e "Tempo de Processamento". Essa restrição é o cerne da justificativa desta pesquisa, pois ambos são de natureza estritamente Operacional e Financeira, focando primariamente na medição da eficiência do fluxo físico dos materiais e na gestão do custo de oportunidade do capital imobilizado em estoque. A etapa subsequente consistiu na identificação desses indicadores utilizados nesse processo.

A partir das respostas à perguntas do roteiro de entrevista aplicado ao engenheiro de produção responsável pela operação de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa (Apêndice A), foram identificados os indicadores atualmente utilizados no setor, bem como sua utilização, apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 – indicadores em uso na logística reversa de inversores da empresa

Indicadores	Explicação
Giro de Estoque	Diferença entre o valor dos equipamentos que saem do estoque e o valor dos que entram.
Tempo de processamento	Intervalo necessário para executar as atividades da logística reversa, desde a triagem até a destinação final.

Fonte: Elaboração própria.

Um dos indicadores utilizados pelo setor, apresentado no Quadro 12, é o giro de estoque, o qual foi definido a partir da necessidade da empresa de reduzir os níveis de inventário, tanto pelo grande volume físico ocupado pelos equipamentos quanto pelo elevado valor financeiro imobilizado em produtos parados. Por isso, busca-se que o valor processado, independentemente de sua destinação, seja superior ao valor dos equipamentos que chegam dos clientes. Outro indicador adotado é o tempo de processamento, definido com o objetivo de assegurar que as atividades não demandem tempos excessivos dos colaboradores. Isso foi justificado, pela empresa, pelo fato de que a receita obtida com produtos remanufaturados e com materiais destinados à reciclagem apresenta margens de lucro menores quando comparada à de produtos novos. Assim, o processo precisa ser conduzido de forma eficiente para garantir sua viabilidade econômica. O monitoramento de ambos os indicadores é realizado mensalmente pela liderança, permitindo avaliar essa eficiência e apoiar mudanças caso sejam necessárias.

O foco exclusivo em métricas operacionais e financeiras gera uma lacuna crítica na gestão da LR, tornando-a incompleta e reativa. Primeiramente, essa limitação ignora a obrigatoriedade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que impõe a responsabilidade compartilhada e exige o monitoramento de resultados nas dimensões ambiental e social. Sem indicadores Ambientais específicos, como a Taxa de Reciclagem ou a Gestão de Resíduos, a empresa não consegue quantificar seu impacto ecológico, demonstrar a correta destinação dos resíduos eletroeletrônicos, nem comprovar o cumprimento das metas de sustentabilidade, expondo-se ao risco ambiental.

Verificou-se, ainda, que a capacidade máxima da empresa para monitoramento restringe-se a aproximadamente dez indicadores, razão pela qual a proposta final foi estruturada de modo a respeitar tal limite. Com isso, os indicadores de logística reversa atualmente utilizados pela organização, apresentados no Quadro 12, juntamente ao fluxograma dos processos do setor (Figura 9), compõem os resultados da Etapa 2, os quais auxiliaram para a construção da proposta apresentada na etapa seguinte.

4.3 ETAPA 3: CONSTRUÇÃO DA PROPOSTA DE INDICADORES DE LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS PARA A EMPRESA

Com os resultados das Etapas 1 e 2, elaborou-se o instrumento de pesquisa que será aplicado ao método Delphi. Os indicadores levantados na revisão bibliográfica do Quadro 11 foram acrescidos dos indicadores em uso pela empresa, apresentados no Quadro 12. O resultado dessa união está apresentado no Quadro 13.

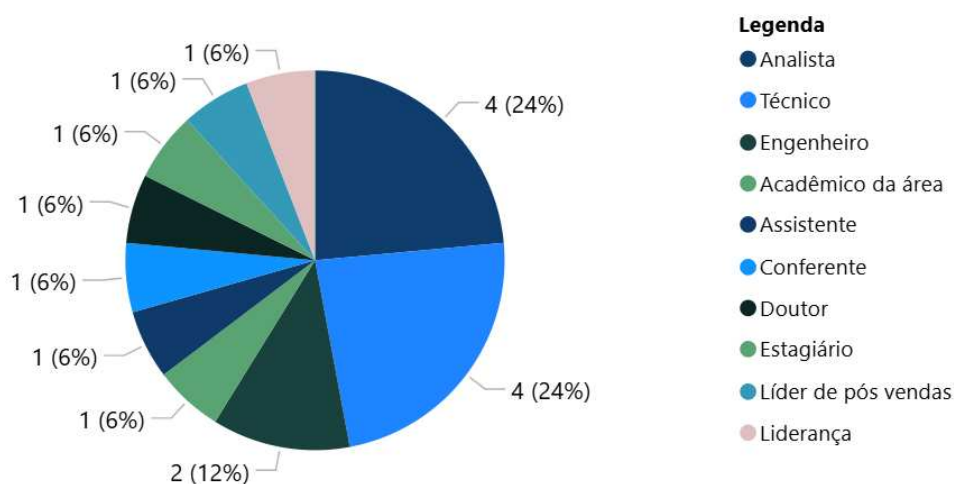
Quadro 13 – Indicadores de logística reversa de inversores por dimensão

Dimensão	Indicador padronizado	Explicação	Origem
Financeira	Custos totais de logística reversa	Soma dos custos de coleta, transporte, processamento e administrativos.	2, 10, 11
	Multas e perdas	Impacto financeiro de multas, produtos danificados ou obsoletos.	2
	Retorno financeiro	Receita, lucro/margem e valor recuperado por reprocessamento/revenda.	2, 11
	Estabilidade financeira	Capacidade de manter equilíbrio econômico frente a investimentos e riscos.	5
	Custo nivelado da eletricidade	Custo de geração de energia ao longo do ciclo de vida.	7, 8, 9
Operacional	Eficiência operacional	Produtividade do processo de logística reversa.	1, 2, 5
	Taxa de retorno	Percentual de materiais retornados em relação às vendas.	2
	Infraestrutura de coleta	Número de veículos e pontos de coleta disponíveis.	2, 10
	Taxa de retorno por canal	Quantidade de produtos retornados por cada canal em relação ao total vendido no canal.	11
	Qualidade do serviço	Quantidade que apresentam defeitos sobre o total produzido.	2
	Giro de Estoque	Diferença entre o valor dos equipamentos que saem do estoque e o valor dos que entram.	Empresa
	Tempo de processamento	Intervalo necessário para executar as atividades da logística reversa, desde a triagem até a destinação final.	Empresa
Ambiental	Gestão de resíduos	Toneladas de resíduos coletados, destinados ou evitados.	2, 3
	Reciclagem e reaproveitamento	Percentual de materiais retornados que são reciclados ou reutilizados corretamente.	2
	Redução de emissões de gases de efeito estufa	Quantificação das emissões evitadas pelo sistema.	2, 4
	Impactos ambientais do ciclo de vida	Mede efeitos que contribuem para aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade.	6, 7, 8, 9
	Uso de recursos naturais	Consumo de água, solo, energia e matérias-primas.	3, 6
	Demanda atendida por energia solar	Contribuição da energia solar para a demanda total.	4
	Diversificação da energia	Grau de diversificação da matriz energética.	4
Legal	Conformidade regulatória	Atendimento a normas legais, certificações e especificações técnicas.	5
Social	Saúde	Avalia condições de trabalho, ergonomia e ginástica laboral.	5
	Segurança	Número de acidentes por homem-hora e condições de trabalho.	2, 5
	Responsabilidade social	Programas sociais, reputação e relações comunitárias.	2, 5
	Desenvolvimento humano	Número de capacitações e treinamento promovidos.	2, 5
	Satisfação dos clientes	Quantidade de opiniões negativas dos clientes (internos e externos).	2
	Empregos criados	Número de empregos diretos e indiretos gerados.	4, 11

Fonte: Elaboração própria.

Com os indicadores do Quadro 13, desenvolveu-se um questionário no Google Forms que está disponível no Apêndice B. Esse instrumento corresponde à primeira rodada do método Delphi e foi aplicado a 13 especialistas em logística reversa de inversores e a 4 acadêmicos, totalizando 17 participantes. A Figura 10 mostra a diversidade de cargos dos participantes.

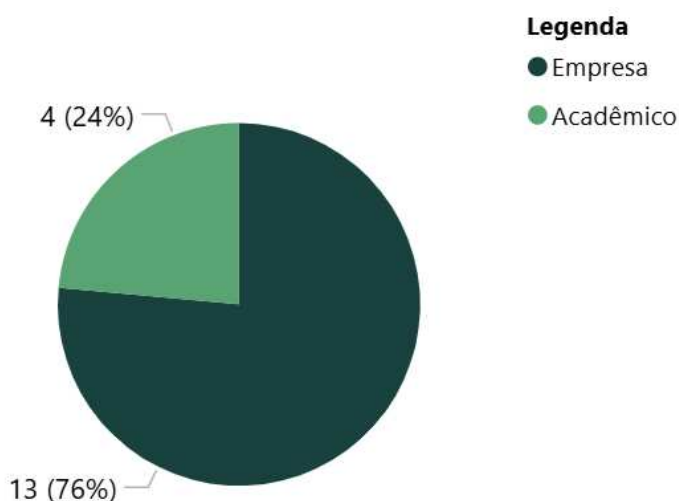
Figura 10 – Cargo dos participantes



Fonte: Elaboração própria.

Conforme mostra a Figura 10, o questionário foi aplicado de forma adequada a um grupo heterogêneo de participantes, composto por acadêmicos e profissionais da empresa. A separação entre esses dois perfis encontra-se detalhada na Figura 11.

Figura 11 – Área de atuação dos participantes

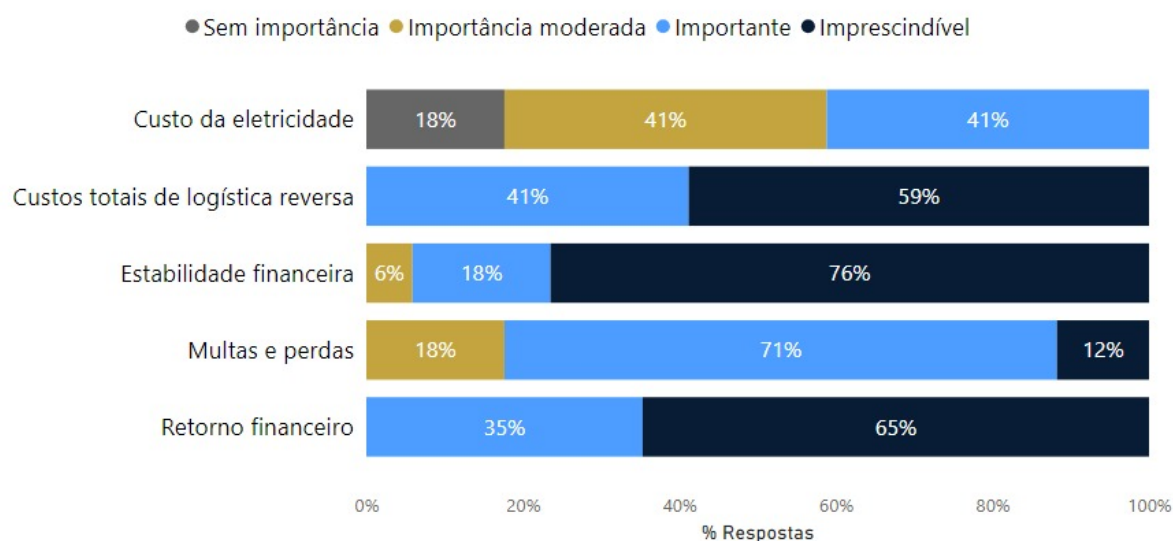


Fonte: Elaboração própria.

Do total dos 17 participantes da primeira rodada 23,5 % são acadêmicos da área de logística reversa e 76,5 % são profissionais com experiência prática na logística reversa.

de inversores fotovoltaicos dos mais diversos cargos. Todos os respondentes classificaram, de 1 a 5, cada indicador conforme a Escala Likert apresentada no Quadro 7, além de um campo aberto para sugerir indicadores não contemplados. Porém nenhum novo indicador foi sugerido para inclusão. A seguir, a Figura 12 traz o resultado da primeira dimensão, com a distribuição de notas para os indicadores financeiros.

Figura 12 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores financeiros de logística reversa de inversores fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 12 apresenta o resultado da avaliação dos indicadores financeiros relacionados à logística reversa de inversores fotovoltaicos na primeira rodada do método Delphi. Observa-se que os indicadores “Custos totais de logística reversa” e “Retorno financeiro” foram os mais bem avaliados, sendo considerados “importantes” ou “imprescindíveis” por todos os respondentes. Esse resultado está em consonância com Radzinski *et al.* (2025), que também elencou esses dois indicadores em sua proposta final destacando a redução de custos como um dos principais ganhos decorrentes da aplicação adequada de indicadores em sistemas de logística reversa. Além disso, o acompanhamento do “Retorno financeiro” é importante para monitorar o valor recuperado com a remanufatura ou revenda dos produtos, contribuindo para a avaliação da viabilidade econômica do processo (Franzini *et al.*, 2019).

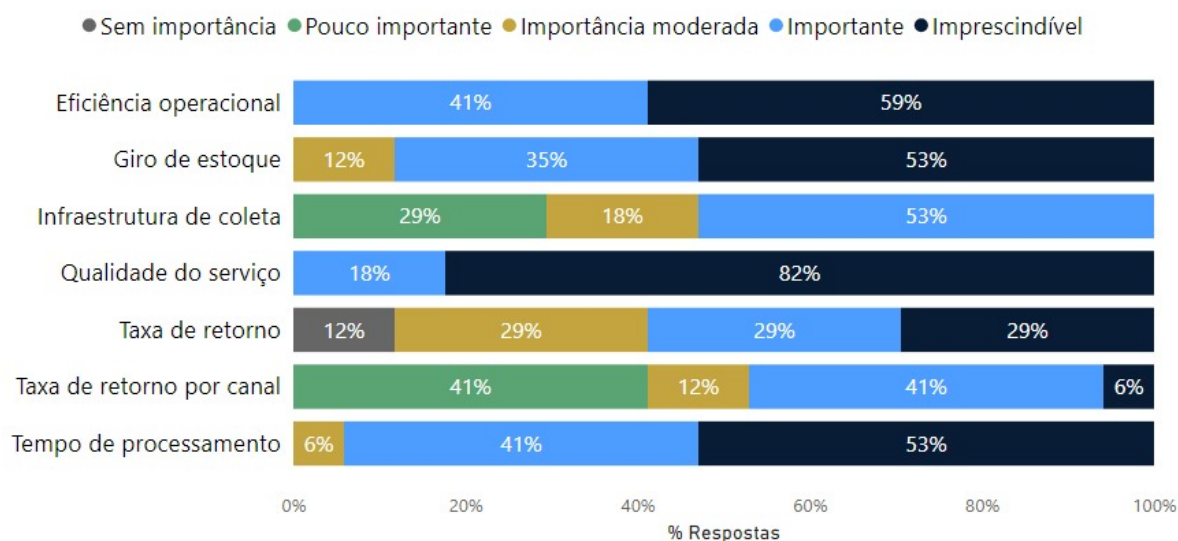
Os indicadores “Estabilidade financeira” e “Multas e perdas” também foram bem avaliados, sendo considerados “importantes” ou “imprescindíveis” por 94 % e 82 % dos respondentes, respectivamente. De acordo com Israel (2024) a “Estabilidade financeira” em projetos solares de grande escala é crucial para garantir o progresso contínuo e mitigar riscos associados ao relacionamentos dos elos da cadeia. O indicador “Multas e perdas”,

também foi elencado por Radzinski *et al.* (2025) como um dos 4 indicadores financeiros no contexto de logística reversa no Brasil.

Por fim, o indicador “Custo da eletricidade” apresentou as maiores divergências de avaliação, sendo classificado como “sem importância” por 18 % dos respondentes e como “importante” por 41 %. O artigo publicado por de Avila Sbampato (2017) calcula o custo da eletricidade não dependente exclusivamente do preço dos inversores, mas também de fatores como manutenção dos sistemas de geração solar, durabilidade dos equipamentos, estruturas de fixação, e de acordo com as observações feitas pelos especialistas no campo aberto do questionário essa mensuração é “pouco aplicável” ao contexto da logística reversa de inversores fotovoltaicos.

Esses resultados mostraram que 4 dos 5 indicadores financeiros obtiveram mais de 50 % das avaliações entre 5 e 4, sendo classificados para a próxima etapa. Em concordância com as proposições dos artigos levantados na primeira etapa, os indicadores financeiros representam um aspecto central para a viabilidade, manutenção das operações, mitigação de riscos e para o desenvolvimento de processos industriais voltados à remanufatura e reciclagem (Chaves; Giuriatto; Ferreira, 2020; Dabees; Barakat; Lisec, 2023). Dando sequência à apresentação dos resultados, a Figura 13 expõe os resultados obtidos para a dimensão operacional.

Figura 13 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores operacionais de logística reversa de inversores fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria.

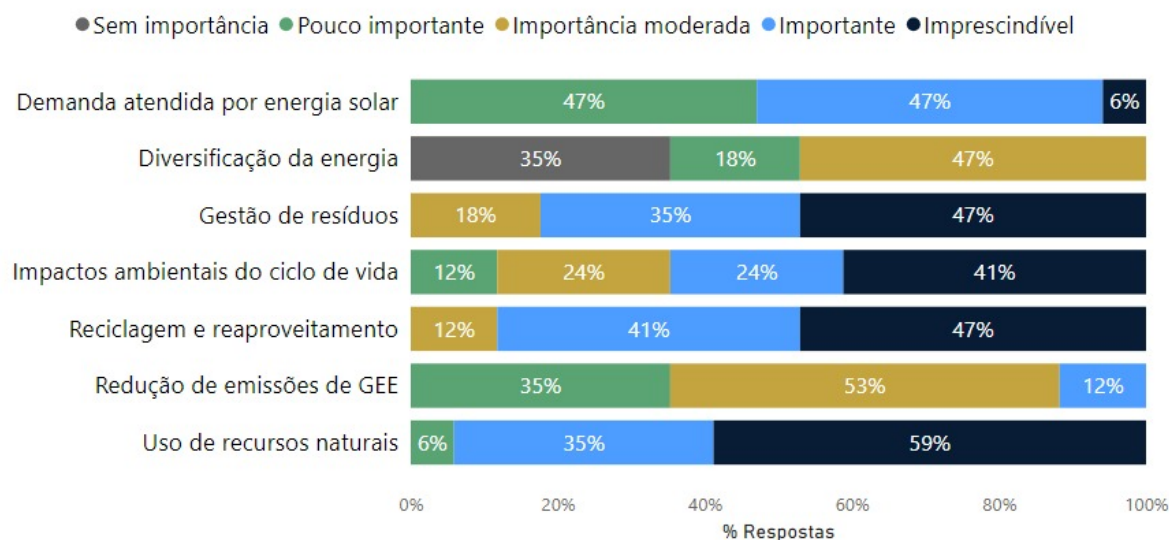
Em relação aos indicadores operacionais, na Figura 13 verifica-se que os indicadores “Eficiência operacional” e “Qualidade do serviço” foram os mais valorizados pelos especialistas, recebendo 100 % de respostas nas categorias “importante” e “imprescindível”. Esses

dois indicadores também integraram a proposta final de indicadores de Radzinski *et al.* (2025), que argumenta que a “Eficiência operacional” aplicada aos sistemas de logística reversa contribui para a redução de resíduos por meio da captura, condução e gestão ambiental assertiva desses materiais. Além disso, o indicador de “Qualidade do serviço” impacta diretamente a relação de custos dos sistemas, ao mesmo tempo em que evidencia melhorias operacionais e a mitigação de perdas (Radzinski *et al.*, 2025).

Outros indicadores, como “Giro de estoque”, “Taxa de retorno” e “Tempo de processamento”, que incluem os dois indicadores já utilizados na empresa, também apresentaram avaliações positivas, embora com maior dispersão nas respostas, o que sugere que sua relevância pode variar conforme a estrutura e o nível de maturidade do sistema logístico. A “Taxa de retorno” também esteve presente na proposta final de Radzinski *et al.* (2025) mas em uma dimensão diferente, chamada de “Indicadores de retorno sobre vendas”. Os outros dois indicadores já são utilizados na empresa e receberam comentários de que mais de uma vez foram considerados em tomadas de decisão das lideranças.

Por sua vez, o indicador “Infraestrutura de coleta” e “Taxa de retorno por canal” foram percebidos como menos determinantes, indicando que seu impacto direto sobre o desempenho da logística reversa de inversores fotovoltaicos ainda é considerado secundário em relação aos demais parâmetros operacionais. Em contraponto, Fernandes (2017) destaca que o ponto de partida para sistemas de logística reversa é possuir infraestruturas que consigam receber, tratar e eventualmente recuperar todo tipo de resíduo, e ainda que fatores como a localização, o acesso e o transporte disponível de extrema importância. Já Franzini *et al.* (2019) ressalta que identificar a “Taxa de retorno por canal” é essencial, uma vez que o índice de devoluções no comércio eletrônico tende a ser superior ao das lojas físicas, devido à maior dificuldade do consumidor em avaliar o produto virtualmente. Complementarmente à avaliação dos resultados dos indicadores operacionais a Figura 14 traz a mesma análise para os indicadores ambientais da proposta inicial.

Figura 14 – Rodada 1: Avaliação dos indicadores ambientais de logística reversa de inversores fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria.

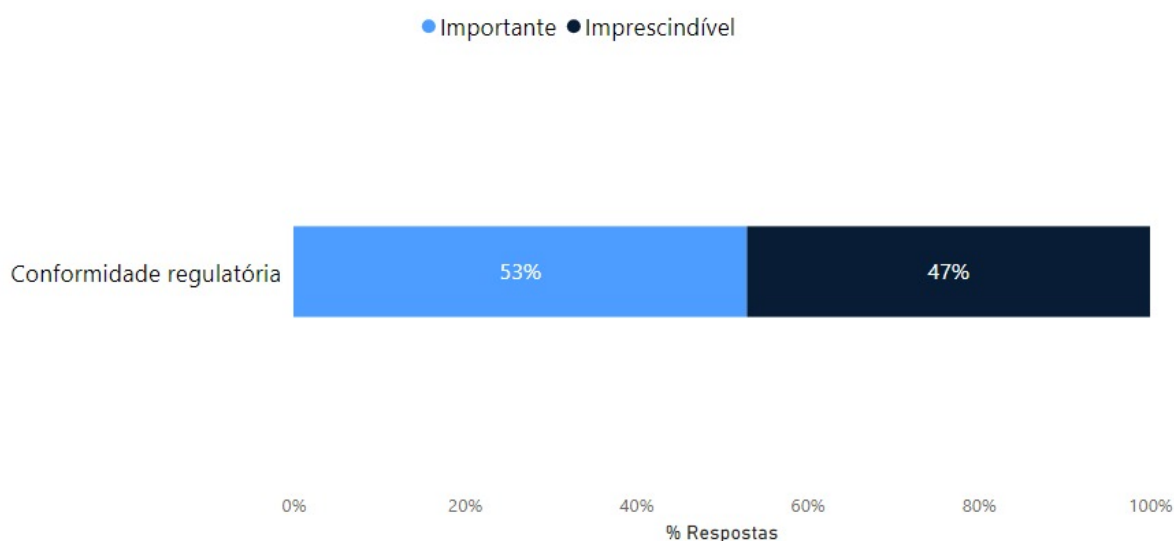
As avaliações atribuídas aos indicadores ambientais de logística reversa de inversores fotovoltaicos abrangeram toda a escala proposta. Os resultados mostram que “Diversificação de energia” é o indicador de menor relevância, classificado como “sem importância” por 35 % dos respondentes. A justificativa apontada pelos participantes é que esse indicador não se aplica ao contexto da logística reversa de inversores fotovoltaicos, uma vez que tais equipamentos são utilizados exclusivamente na geração de energia solar. Assim, embora a diversificação energética seja um parâmetro relevante para a avaliação da sustentabilidade e da confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, não apresenta pertinência direta para mensuração do desempenho das operações de logística reversa dos inversores fotovoltaicos e por isso não avançou para a próxima rodada do método Delphi.

Por outro lado, o indicador “Reciclagem e reaproveitamento” obteve as maiores pontuações, sendo avaliado como “imprescindível” por 47 % e “importante” por 41 % dos respondentes. Além dele, os indicadores “Gestão de resíduos” e “Redução de emissões de gases de efeito estufa” também integraram a proposta final de Radzinski *et al.* (2025), porém no presente estudo de caso o indicador “Redução de emissões de gases de efeito estufa” não obteve mais de 50 % das avaliações como “importante” ou “imprescindível” e por isso não foi incluído na próxima rodada.

O indicador “Demanda atendida por energia solar” foi considerado central para a avaliação da sustentabilidade da cadeia de fornecimento de energia solar para Becerra-Fernandez, Sarmiento e Cardenas (2023), no presente estudo ele obteve quase 50 % das respostas como “importante” e 6 % como “imprescindível”, atendendo ao critério para avançar para a próxima rodada. Da mesma forma, os dois indicadores utilizados por Adri-

ano (2015), “Impactos ambientais do ciclo de vida” e “Uso de recursos naturais”, também alcançaram o critério indicando que os especialistas consultados também reconhecem a relevância desses indicadores para a mensuração do desempenho ambiental. Em relação aos indicadores legais, a Figura 15 apresenta o resultado da avaliação do único indicador identificado na literatura, a “Conformidade regulatória”.

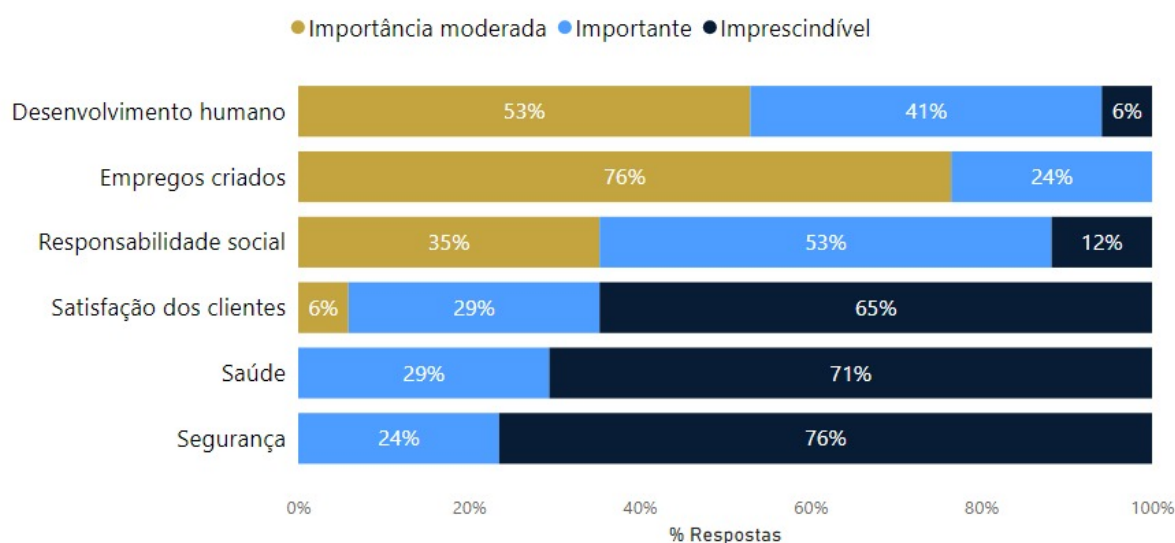
Figura 15 – Rodada 1: Avaliação indicadores legais de logística reversa de inversores fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que todos os participantes o classificaram entre as categorias “importante” (53 %) e “imprescindível” (47 %), o que demonstra consenso quanto à sua relevância para garantir que o processo de logística reversa de inversores fotovoltaicos ocorra em conformidade com as normas ambientais e regulatórias aplicáveis. Esse resultado corrobora com o entendimento apresentado por Wibowo *et al.* (2022) de que a conformidade legal é considerada altamente relevante para o sucesso e a legitimidade desse tipo de operação. Por fim, para os indicadores sociais, a Figura 16 apresenta os resultados obtidos na primeira rodada do método Delphi.

Figura 16 – Rodada 1: Avaliação indicadores sociais de logística reversa de inversores fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se na Figura 16 que os indicadores “Segurança” e “Saúde” foram os mais bem avaliados, sendo classificados como “importantes” e “imprescindíveis” por todos os respondentes. Esses resultados estão em consonância com os achados de Israel (2024), que destaca as condições básicas de trabalho, o bem-estar e a integridade física e psicológica dos colaboradores como fatores cruciais para o desempenho organizacional e para a sustentabilidade social das operações.

Os 2 indicadores, propostos por Radzinski *et al.* (2025), “Satisfação dos clientes” e “Responsabilidade social” também apresentaram avaliações positivas, reforçando a importância das relações com stakeholders e da imagem institucional das empresas.

Por outro lado, “Desenvolvimento humano” e “Empregos criados” receberam notas concentradas nas categorias “importância moderada” e “importante”, e comentários sugerindo que, embora relevantes, são dimensões percebidas como de efeito indireto sobre o desempenho da logística reversa de inversores fotovoltaicos, estando mais associadas à impactos sociais de longo prazo do que ao desempenho imediato. Esses dois indicadores não atingiram o critério dessa etapa, logo não foram incluídos na segunda rodada do método. Porém, para Israel (2024) o indicador “Desenvolvimento humano” reflete o bem-estar social, podendo contribuir para a redução dos índices de pobreza e para a melhoria dos padrões de vida (Israel, 2024). Da mesma forma que Becerra-Fernandez, Sarmiento e Cardenas (2023) argumenta que a geração de novos empregos é de alto impacto tecnológico e social, e por isso foi utilizado pelo mesmo para avaliar a sustentabilidade da cadeia de fornecimento de energia solar na Colômbia. O resultado da classificação de relevância de todos os indicadores da primeira rodada do método Delphi encontra-se consolidado na

Tabela 3.

Tabela 3 – Rodada 1 — Estatísticas quantitativas por indicador

Dimensão	Mediana	Média	Desvio padrão	Notas 4 ou 5
Indicadores financeiros				
Custo da eletricidade	3	3,1	1,1	41 %
Custos totais de logística reversa	5	4,6	0,5	100 %
Estabilidade financeira	5	4,7	0,6	94 %
Multas e perdas	4	3,9	0,5	82 %
Retorno financeiro	5	4,6	0,5	100 %
Indicadores operacionais				
Eficiência operacional	5	4,6	0,5	100 %
Giro de estoque	5	4,4	0,7	88 %
Infraestrutura de coleta	4	3,2	0,9	53 %
Qualidade do serviço	5	4,8	0,4	100 %
Taxa de retorno	4	3,6	1,2	59 %
Taxa de retorno por canal	3	3,1	1,0	47 %
Tempo de processamento	5	4,5	0,6	94 %
Indicadores ambientais				
Demanda atendida por energia solar	4	3,1	1,1	53 %
Diversificação da energia	2	2,1	0,9	0 %
Gestão de resíduos	4	4,3	0,7	82 %
Impactos ambientais do ciclo de vida	4	3,9	1,1	65 %
Reciclagem e reaproveitamento	4	4,4	0,7	88 %
Redução de emissões de GEE	3	2,8	0,6	12 %
Uso de recursos naturais	5	4,5	0,8	94 %
Indicadores legais				
Conformidade regulatória	4	4,5	0,5	100 %
Indicadores sociais				
Desenvolvimento humano	3	3,5	0,6	47 %
Empregos criados	3	3,2	0,4	24 %
Responsabilidade social	4	3,8	0,6	65 %
Satisfação dos clientes	5	4,6	0,6	94 %
Saúde	5	4,7	0,5	100 %
Segurança	5	4,8	0,4	100 %

Fonte: Elaboração própria.

Na avaliação desta rodada, todos os indicadores atenderam ao critério de desvio padrão $< 1,5$, indicando que houve consenso entre os participantes quanto às notas. Além disso, seis dos 26 indicadores não obtiveram mais de 50 % das respostas nos níveis 4 ou 5, sugerindo baixa importância atribuída ao indicador e por isso foram retirados do modelo restando 20 indicadores de logística reversa de inversores ao final dessa etapa.

Visto que durante a entrevista semiestruturada, a empresa estabeleceu o limite máximo de dez indicadores a serem implementados e que a aplicabilidade prática de cada

indicador depende das características do processo, como maturidade e dados disponíveis. Tornou-se necessária a realização de uma segunda rodada do método Delphi, na qual os 20 indicadores restantes foram submetidos aos 13 profissionais que atuam diretamente no setor de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa e que haviam respondido à primeira rodada.

Nessa etapa, cada especialista foi munido da fórmula básica de cálculo de cada indicador e convidado a avaliar a aplicabilidade à realidade da empresa entre "sim", "parcialmente" e "não". O formulário aplicado se encontra no Apêndice C. A Tabela 4, além de recapitular a mediana e o percentual de notas 4 ou 5 obtidos na rodada anterior, apresenta também a distribuição das respostas desta rodada, indicando as porcentagens atribuídas a cada opção.

Tabela 4 – Rodada 2 - Aplicabilidade de cada indicador na empresa

Nome do indicador	Mediana	% notas 4/5	% sim	% parcial	% não
Indicadores financeiros					
Custos totais de logística reversa	5	100 %	77 %	23 %	0 %
Estabilidade financeira	5	94 %	31 %	69 %	0 %
Multas e perdas	4	82 %	31 %	46 %	23 %
Retorno financeiro	5	100 %	54 %	46 %	0 %
Indicadores operacionais					
Eficiência operacional	5	100 %	92 %	0 %	8 %
Giro de estoque	5	88 %	92 %	8 %	0 %
Infraestrutura de coleta	4	53 %	0 %	77 %	23 %
Qualidade do serviço	5	100 %	54 %	23 %	23 %
Taxa de retorno	4	59 %	31 %	46 %	23 %
Tempo de processamento	5	94 %	38 %	54 %	8 %
Indicadores ambientais					
Demanda atendida por energia solar	4	53 %	0 %	54 %	46 %
Gestão de resíduos	4	82 %	38 %	31 %	31 %
Impactos ambientais do ciclo de vida	4	65 %	8 %	38 %	54 %
Reciclagem e reaproveitamento	4	88 %	31 %	46 %	23 %
Uso de recursos naturais	5	94 %	23 %	54 %	23 %
Indicadores legais					
Conformidade regulatória	4	100 %	62 %	15 %	23 %
Indicadores sociais					
Responsabilidade social	4	65 %	0 %	69 %	31 %
Satisfação dos clientes	5	94 %	54 %	46 %	0 %
Saúde	5	100 %	54 %	23 %	23 %
Segurança	5	100 %	62 %	38 %	0 %

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados da segunda rodada, apresentados na Tabela 4, foi possível elaborar a proposta de indicadores para a logística reversa de inversores fotovoltaicos,

validados por especialistas e acadêmicos, e avaliados quanto à aplicabilidade à realidade da empresa estudada. A proposta foi organizada em três níveis distintos:

- a) **Aplicação imediata:** indicadores cuja maioria das respostas foi "sim", considerados de elevada relevância teórica e prática, amplamente validados pelos profissionais e com potencial de gerar ganhos significativos para a empresa;
- b) **Para avaliação e validação:** indicadores cuja maior parte das respostas foi "parcialmente", reconhecidos como pertinentes, mas que exigem testes adicionais ou discussões mais aprofundadas antes de sua implementação efetiva;
- c) **Descartados:** indicadores cuja predominância das respostas foi "não", indicando ausência de aplicabilidade ao contexto da empresa, seja por baixa relevância, redundância ou inviabilidade de mensuração.

Os Quadros 14, 15 e 16 apresentam a consolidação dos indicadores classificados segundo sua aplicabilidade prática na logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa estudada. Neles são listados, respectivamente, os indicadores recomendados para aplicação imediata, seguidos daqueles destinados à avaliação complementar e os descartados por não se adequarem à realidade da empresa. Para os indicadores a implementar, apresenta-se o método de cálculo compatível com os dados disponíveis no processo; para o indicador descartado, mostra-se a justificativa com base na percepção dos respondentes da segunda rodada do Delphi.

Quadro 14 – Indicadores a serem implementados imediatamente

Dimensão	Indicador	Mediana	% notas 4/5	Método de cálculo [Unidade]
Financeira	Custos totais de logística reversa	5	100 %	Custo de Coleta + Transporte + Processamento + Administrativos [R\$/período]
Financeira	Retorno financeiro	5	100 %	Receitas de venda de remanufaturados, peças e sucata [R\$/período]
Operacional	Eficiência operacional	5	100 %	Itens processados / homem-hora (HH) [itens/HH]
Operacional	Giro de estoque	5	88 %	Valor de saídas – valor de entradas [R\$/período]
Operacional	Qualidade do serviço	5	100 %	Remanufaturados que apresentam defeito / total remanufaturado × 100 [%]
Ambiental	Gestão de resíduos	4	82 %	Peso de resíduos coletados + destinados + evitados [kg/período]
Legal	Conformidade regulatória	4	100 %	Itens conformes / itens auditados × 100 [%]
Social	Satisfação dos clientes	5	94 %	Pesquisa de satisfação (NPS) [%]
Social	Saúde	5	100 %	Dias com temperatura adequada + ginástica laboral [dias/período]
Social	Segurança	5	100 %	Número de acidentes de trabalho [acidentes/período]

Fonte: Elaboração própria.

Os 10 indicadores elencados no Quadro 14 para implementação imediata reúnem dois atributos: alta relevância teórica e prática (medianas elevadas e percentuais de notas 4 ou 5 maiores que 50 %); e viabilidade de aplicação (maioria de respostas "sim" na segunda rodada). A inclusão dos métodos de cálculo no Quadro 14 sugere as fórmulas de mensuração porém ainda podem ser mais adaptadas se necessário, desde que seja mantido um padrão que assegure reprodutibilidade dos cálculos. Destacam-se, nesse conjunto, todas as 5 dimensões: operacional, financeira, legal e social, compondo um painel equilibrado entre desempenho, custo e risco assim como propostas na literatura.

Para Radzinski *et al.* (2025) e Franzini *et al.* (2019), os dois indicadores financeiros dessa proposta permitem um controle mais eficiente do resultado contábil das operações, assegurando a viabilidade financeira da empresa. No que se refere à dimensão operacional, um dos dois indicadores já utilizados pela empresa, o giro de estoque, obteve validação quanto à sua relevância, corroborando observações anteriores de que esse indicador é fre-

quentemente considerado em processos decisórios das lideranças. O indicador operacional “Eficiência Operacional” e o indicador ambiental “Gestão de Resíduos”, classificados para implementação imediata, também estavam presentes na proposta final de Radzinski *et al.* (2025).

As dimensões legal e social contemplaram três indicadores recomendados por Israel (2024), “Conformidade regulatória”, “Saúde” e “Segurança”, originalmente aplicados no contexto de escolhas sustentáveis na seleção de fornecedores de materiais na indústria de energia solar na Flórida. Ainda assim, mostraram-se igualmente pertinentes ao escopo de uma empresa de grande porte na região de Florianópolis. No âmbito social, Radzinski *et al.* (2025) já havia destacado o indicador “Satisfação dos clientes” como essencial para garantir que o processo atinja o valor que o cliente busca, seja no produto ou no serviço. Além dos 10 indicadores sugeridos para implementação imediata outros 9 indicadores se mostraram relevantes mas que a implementação nessa empresa ainda precisa ser melhor estudada, sendo eles descritos no Quadro 15.

Quadro 15 – Indicadores para validação

Dimensão	Indicador	Mediana	% notas 4/5	Método de cálculo [Unidade]
Financeira	Estabilidade financeira	5	94 %	Receitas (remanuf. + sucata) / Custos totais
Financeira	Multas e perdas	4	82 %	Multas + perdas por danos/obsolescência [R\$/período]
Operacional	Infraestrutura de coleta	4	53 %	Nº de veículos + pontos de coleta + municípios atendidos
Operacional	Taxa de retorno	4	59 %	Quantidade retornada / quantidade vendida $\times 100$ [%]
Operacional	Tempo de processamento	5	94 %	data/hora de conclusão – data/hora de entrada [h]
Ambiental	Demanda atendida por energia solar	4	53 %	Capacidade de geração dos equipamentos [MW/período]
Ambiental	Reciclagem e reaproveitamento	4	88 %	(Quantidade reciclado + reutilizado) / retornado $\times 100$ [%]
Ambiental	Uso de recursos naturais	5	94 %	kWh consumidos / itens processados [kWh/item]
Social	Responsabilidade social	4	65 %	Nº de programas sociais + participação em ações comunitárias

Fonte: Elaboração própria.

Os 9 indicadores classificados para validação, presentes no Quadro 15, são considerados importantes, porém demandam ajustes de dados, padronização de procedimentos ou pilotos de mensuração antes da adoção plena. Caso a empresa consiga expandir o número de indicadores a serem monitorados, recomenda-se um plano de teste em ciclos mensais, revisão de dados disponíveis e critérios de cálculo, para estes 9 indicadores. Por fim, 1 indicador não se mostrou aplicável à realidade da empresa e por isso foi descartado, como mostra o Quadro 16.

Quadro 16 – Indicadores a serem descartados

Dimensão	Indicador	Mediana	% notas 4 ou 5	Justificativa
Ambiental	Impactos ambientais do ciclo de vida	4	65 %	Baixa aplicabilidade operacional: requer análises detalhadas de avaliação do ciclo de vida, exigindo bases externas; alto esforço de dados não direcionado à gestão do processo reverso, podendo ser tratado em estudos corporativos específicos.

Fonte: Elaboração própria.

Segundo comentários da segunda rodada o indicador listado no Quadro 16 apresentou baixa aplicabilidade operacional no curto prazo, exigindo insumos que extrapolam o escopo e a rotina do setor; assim, recomenda-se seu tratamento em estudos corporativos específicos, sem prejuízo ao monitoramento da logística reversa dos inversores fotovoltaicos. Apesar desse indicador ter sido sugerido por Adriano (2015), o referido estudo foi conduzido em Portugal, país que apresenta características econômicas, culturais e geográficas distintas de Florianópolis (SC) situada no Brasil.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral propor indicadores à logística reversa de inversores fotovoltaicos, com foco na geração de valor econômico, na eficiência operacional e na redução de impactos ambientais em uma empresa de grande porte do setor eletroeletrônico situada na Grande Florianópolis (SC).

A relevância do tema decorre do crescimento da energia solar no Brasil, que já foi a que mais cresceu nos últimos anos e possui as maiores projeções de acréscimo de capacidade instalada (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025). Diante desse cenário, a ampliação do uso de sistemas fotovoltaicos, que dependem de inversores, abre oportunidade para a estruturação de processos de logística reversa eficientes. Adicionalmente, por se tratarem de produtos eletroeletrônicos, os inversores estão sujeitos às exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece responsabilidade compartilhada e sistemas obrigatórios de logística reversa. Foi notável a falta de estudos avaliando as alternativas de logística reversa desses equipamentos bem como as melhores alternativas de mensurar a eficiência e eficácia desses processos.

Para alcançar o objetivo proposto, a pesquisa foi organizada em três etapas. Na Etapa 1, realizou-se revisão bibliográfica sistemática por meio do método PRISMA, resultando na consolidação de 24 indicadores distribuídos nas dimensões financeira, operacional, ambiental, social e legal. Na Etapa 2, conduziu-se um estudo de caso em uma das 10 maiores fornecedoras de inversores fotovoltaicos do Brasil, mapeando o processo de logística reversa de inversores na empresa, sintetizado em um fluxograma, e identificando dois indicadores de cunho operacional/financeiro atualmente em uso pela organização. Por fim na Etapa 3, aplicou-se o método Delphi em duas rodadas, com profissionais da empresa e acadêmicos, para validar a relevância e a aplicabilidade dos indicadores identificados resultando na proposição final de dez indicadores para implementação imediata, além de classificar outros nove indicadores para validação futura..

A principal contribuição acadêmica do TCC reside no desenvolvimento de um conjunto de dez indicadores validados e aplicáveis apresentados no Quadro 14. Do total, nove têm origem na revisão bibliográfica e um já era utilizados pela empresa, evidenciando contribuições mútuas entre os achados teóricos e as práticas operacionais. Ao utilizar uma metodologia robusta (PRISMA e Delphi), o estudo preenche uma lacuna na literatura brasileira e internacional sobre métricas de LR específicas para o setor de inversores fotovoltaicos, um produto de alta complexidade e valor estratégico, submetido à PNRS. O trabalho reforça a necessidade de abordagens multidimensionais, demonstrando que o consenso de especialistas exige a incorporação de aspectos Ambientais, Legais e Sociais além das tradicionais métricas financeiras e operacionais.

Além dos 10 indicadores presentes no Quadro 14, os nove indicadores, descritos no Quadro 15 foram classificados para avaliação complementar, por exigirem dados atualmente

indisponíveis, padronização de procedimentos ou pilotos de mensuração. Identificou-se, ainda, que o indicador "impactos ambientais do ciclo de vida" deve ser tratado fora do escopo operacional imediato, dada a complexidade metodológica e o alto esforço de dados.

No quesito de contribuição empresarial, o trabalho corrobora para a empresa estudada, pois o TCC oferece um produto de valor imediato: um painel de gestão otimizado com dez indicadores de alta relevância e viabilidade de aplicação. A proposta eleva a gestão da Logística Reversa de um processo focado apenas em custo e tempo ("Giro de Estoque" e "Tempo de Processamento") para uma visão estratégica e integral. Ao integrar indicadores como "Gestão de Resíduos", "Conformidade Regulatória", "Saúde" e "Segurança", o trabalho permite à organização assegurar o cumprimento legal da PNRS e mitigar riscos, além de potencializar a geração de valor econômico por meio do monitoramento do "Retorno Financeiro". A contribuição é tangível na melhoria da eficiência operacional, na redução de impactos ambientais e no fortalecimento da credibilidade da marca para a empresa que possui grande participação no mercado nacional desses produtos.

5.1 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente, reconhece-se que as limitações da pesquisa atual, notadamente a aplicação em uma única organização do setor eletroeletrônico na Grande Florianópolis e a escolha de priorizar a proposição de indicadores em detrimento da análise detalhada de custos, recomendam cautela na generalização dos resultados. Isso posto, os desdobramentos propostos visam expandir a validade e o escopo do modelo.

A principal sugestão de trabalho futuro concentra-se na validação prática dos indicadores complementares. Isso envolve a elaboração de um Plano de Análise e Teste Piloto para os nove indicadores classificados para avaliação (Quadro 15), os quais exigem dados atualmente indisponíveis ou padronização de procedimentos. Tal plano deve detalhar a revisão de dados, os critérios de cálculo e a execução de pilotos de mensuração, visando confirmar a viabilidade e a relevância desses indicadores antes de sua implementação integral.

Outro desdobramento crucial é a realização de estudos comparativos interorganizacionais. Sugere-se a aplicação da proposta de indicadores em outras empresas do setor de tecnologia ou energia solar, verificando as convergências e as adaptações necessárias em diferentes contextos operacionais. Isso não apenas enriquecerá a base de dados do setor, mas também solidificará a aplicabilidade do modelo em um contexto mais amplo.

Adicionalmente, recomenda-se ampliar a análise para incluir a logística reversa dos demais componentes de um sistema de geração solar, como módulos fotovoltaicos. Esses elementos, assim como os inversores, possuem materiais de alto valor agregado e potencial de impacto ambiental significativo quando descartados de forma inadequada.

Por fim, é essencial um aprofundamento na análise econômica e de sustentabilidade

da Logística Reversa. Recomenda-se a realização de uma análise econômica detalhada da remanufatura, quantificando o valor recuperado em cada etapa do processo e seu impacto direto no desempenho financeiro da LR. Em paralelo, a execução de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos inversores fotovoltaicos é vital para medir os impactos ambientais reais e a redução de emissões, fornecendo a base científica para tratar a dimensão do indicador "Impactos ambientais do ciclo de vida" fora do escopo operacional imediato.

REFERÊNCIAS

ADESOGA, T. O. *et al.* Review of reverse logistics practices and their impact on supply chain sustainability. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 12, n. 2, 2024. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.12.2.1216.

ADRIANO, G. L. M. **Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal**. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Ralie**. Acesso em: 11 set. 2025. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **RESOLUÇÃO Nº 5.998, DE 3 DE NOVEMBRO DE 2022**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00005998&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DG/ANTT/MI&vlr_ano=2022&seq_ato=000&cod_modulo=161&cod_menu=5408. Acesso em: 16 ago. 2025.

AHLSTRÖM, F. *et al.* Performance Indicators of Textile Reverse Logistics. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 442, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/442/1/012012.

ANNE, B. *et al.* GESTÃO DE RESÍDUO FOTOVOLTAICO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O CENÁRIO DE FIM DE VIDA DO SISTEMA. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, 2023. DOI: 10.59627/cbens.2020.1011.

ANVISA. **Porte de empresas: esclareça todas as suas dúvidas**. Acesso em: 17 ago. 2025. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2019/porte-de-empresas-esclareca-todas-as-suas-duvidas>.

ARMSTRONG, J. S. **Long Range Forecasting: From Crystal Ball to Computer**. 2. ed. New York: Wiley, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Áreas e Subáreas da Engenharia de Produção. *In: XLIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Fortaleza, Ceará: [s.n.], 2023. Acessado em: 15 ago. 2025. Disponível em: <https://portal.abepro.org.br/enegep/2023/wp-content/uploads/2023/03/Areas-e-Subareas-da-Engenharia-de-Producao.pdf>.

BALLOU, R. H. The evolution and future of logistics and supply chain management. **Production**, v. 16, n. 3, p. 375–386, set. 2006.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **A energia solar no Brasil**. Acesso em: 16 ago. 2025. 2018. Disponível em: <https://>

[//blogdodesenvolvimento.bndes.gov.br/blogdodesenvolvimento/detalhe/A-energia-solar-no-Brasil/](https://blogdodesenvolvimento.bndes.gov.br/blogdodesenvolvimento/detalhe/A-energia-solar-no-Brasil/).

BECERRA-FERNANDEZ, M.; SARMIENTO, A. T.; CARDENAS, L. M. Sustainability assessment of the solar energy supply chain in Colombia. **Energy**, v. 282, p. 128735, 2023. ISSN 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128735>.
Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223021291>.

BEILER, B. C. *et al.* Reverse logistics system analysis of a Brazilian beverage company: An exploratory study. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122624, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122624.

BOGDAN, R. S.; BIKEN, S. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. 12. ed. Porto: Porto, 2003.

BOTTANI, E. *et al.* Economic and environmental sustainability dimensions of a fashion supply chain: a quantitative model. **Production**, v. 30, e20190156, 2020.

BOUZON, M. *et al.* Panorama prático-teórico do ambiente de recuperação de produtos: um estudo de caso em uma remanufatura de produtos de telecomunicações. *In*: 30. ENCONTRO Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP. [S.l.: s.n.], 2010.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022 — Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. [S.l.: s.n.], 2022. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm.
Presidência da República, Casa Civil, Brasília.

_____. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 — Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. [S.l.: s.n.], 2010.
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.
Presidência da República, Casa Civil, Brasília.

_____. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 — Marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS)**. Brasília: Presidência da República, Casa Civil, 2022. Acesso em: 16 ago. 2025.
Disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023**. [S.l.: s.n.], 2023. Publicado em: Portal MME, 2023.
Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 16 ago. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **SIEBrasil: Sistema de Informações de Energia**. [S.l.: s.n.], 2023. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.siebrasil.gov.br>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BUTT, A. S.; ALI, I.; GOVINDAN, K. The role of reverse logistics in a circular economy for achieving sustainable development goals: a multiple case study of retail firms. **Production Planning & Control**, Taylor & Francis, v. 35, n. 12, p. 1490–1502, 2024.

CASARIN, R. **Ranking lista maiores fornecedores de inversores solares do Brasil em 2023**. Acessado em: 04 dez. 2025. Jan. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/ranking-lista-maiores-fornecedores-de-inversores-solares-do-brasil-em-2023>.

CHAVES, G.; GIURIATTO, N. T.; FERREIRA, K. A. Reverse logistics performance measures: a survey of Brazilian companies. **Brazilian journal of operations & production management**, v. 17, 2020. DOI: 10.14488/bjopm.2020.018.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da Cadeia de Suprimentos: estratégia, planejamento e operações**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

CHRISTIE, C. A.; BARELA, E. The Delphi technique as a method for increasing inclusion in the evaluation process. Versão inglesa. **Canadian Journal of Program Evaluation**, v. 20, n. 1, p. 105–122, 2005.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **Supply Chain Definitions and Glossary**. Acesso em: 23 jun. 2025. 2024. Disponível em: https://cscmp.org/CSCMP/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921.

DA SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022.

DABEES, A.; BARAKAT, M.; LISEC, A. A framework for adopting a sustainable reverse logistics service quality for reverse logistics service providers: A systematic literature review. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 1755, 2023. DOI: 10.3390/su15031755.

DALKEY, N. C. The Delphi method: An experimental study of group opinion, 1969.

DAVID, P. A. **Logística internacional: gestão de operações de comércio internacional**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

DE ALMEIDA XAVIER, J. M. **Tecnologias de Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos**. 2024. Tese (Doutorado) – UNIVERSIDADE DE LISBOA.

DE AVILA SBAMPATO, B. Comparative analysis between mono-Si and OPV photovoltaic devices: accelerated aging experiments applied to LCA and LCOE. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

DE OLIVEIRA MORAIS, M.; MORAIS, G. A.; DE OLIVEIRA COSTA NETO, P. L. A Logística Reversa de Pneus: Estudo de Caso de uma Empresa de Reciclagem. **Revista FSA**, v. 17, p. 166–181, 2020. DOI: 10.12819/2020.17.3.10.

FANG, C.; FAN, S.; QIU, Y. The choice of remanufacturing strategy for the OEM with third-party remanufacturers' advantages. **Comput. Ind. Eng.**, v. 176, p. 108973, 2023. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108973.

FERNANDES, R. C. B. D. **Gestão da Logística Inversa na Construção Civil e Obras Públicas**. 2017. Diss. (Mestrado) – Universidade de Aveiro (Portugal).

FOFOU, R. F.; JIANG, Z.; WANG, Y. A Review on the Lifecycle Strategies Enhancing Remanufacturing. **Applied Sciences**, 2021. DOI: 10.3390/app11135937.

FRANZINI, C. E. *et al.* Impacto e destinação dos celulares retornados ao fabricante, no mercado brasileiro. Universidade Nove de Julho, 2019.

GACKOWIEC, P. *et al.* Review of Key Performance Indicators for Process Monitoring in the Mining Industry. **Energies**, 2020. DOI: 10.3390/en13195169.

GALHARDI, L. S. **Análise multicritério das barreiras da logística reversa do setor de eletroeletrônicos no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/255806>. Acesso em: 14 ago. 2025.

GERVAIS, E. *et al.* Sustainability, Criticality, and Circularity in PV: Using SDG 12 as a Lens to Map Sectoral Gaps. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 12, n. 1, p. 161–166, 2022. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3120986.

GIANNAROU, L.; ZERVAS, E. Using Delphi technique to build consensus in practice. **International Journal of Business Science and Applied Management**, 2014. DOI: 10.69864/ijbsam.9-2.106.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **GRI Standards 2021: Universal Standards**. Amsterdam, 2021. Disponível em: <https://www.globalreporting.org/standards/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, R. *et al.* Principais dimensões na construção da circular Cadeia de suprimentos: uma revisão bibliográfica. **Sustainability**, v. 12, p. 2459, 2020. DOI: 10.3390/su12062459.

GOZACAN-CHASE, N.; LAFÇI, Ç. Evaluation of Key Performance Indicators of Logistics Firms. **Logistics & Sustainable Transport**, v. 11, p. 24–32, 2020. DOI: 10.2478/jlst-2020-0002.

GRUEZO-VALENCIA, D. F.; SOLIS-MORA, V. S. Inversores inteligentes de energía solar fotovoltaica. **Polo del Conocimiento**, v. 7, n. 4, p. 1246–1266, 2022.

GUARNIERI, P. **Logística Reversa: em busca do equilíbrio econômico e ambiental**. Brasil: Clube de Autores, 2011.

HAMDI, S. E.; ABOUABDELLAH, A. Logistics: Impact of Industry 4.0. **Applied Sciences**, 2022. DOI: 10.3390/app12094209.

HAMMES, G. *et al.* Evaluation of the reverse logistics performance in civil construction. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 248, p. 119212, 2020.

INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica – Edição 2018**. Florianópolis: IDEAL, 2018. Disponível em: <http://www.institutoideal.org>. Acesso em: 16 ago. 2025.

ISRAEL, E. C. M. **A decision support model to perform sustainable choices concerning the selection of material suppliers in the solar energy industry**. 2024. Tese (Doutorado) – Instituto Superior de Economia e Gestão.

JEBB, A. T.; NG, V.; TAY, L. A Review of Key Likert Scale Development Advances: 1995–2019. **Frontiers in Psychology**, v. 12, 2021. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.637547.

JOSHI, A. *et al.* Likert Scale: Explored and Explained. **British Journal of Applied Science and Technology**, v. 7, p. 396–403, 2015. DOI: 10.9734/BJAST/2015/14975.

KANISHKA, K.; ACHERJEE, B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. **Journal of Manufacturing Processes**, 2023. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.034.

KAZANÇOĞLU, Y. *et al.* Performance evaluation of reverse logistics in food supply chains in a circular economy using system dynamics. **Business Strategy and The Environment**, 2020. DOI: 10.1002/bse.2610.

KOO, M.; YANG, S.-W. Likert-Type Scale. **Encyclopedia**, 2025. DOI: 10.3390/encyclopedia5010018.

KUMAR SINGH, S.; CHAUHAN, A.; SARKAR, B. Supply chain management of e-waste for end-of-life electronic products with reverse logistics. **Mathematics**, MDPI, v. 11, n. 1, p. 124, 2022.

LENORT, R. *et al.* SELECTING SUSTAINABILITY KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR SMART LOGISTICS ASSESSMENT. **Acta logistica**, 2022. DOI: 10.22306/al.v9i4.350.

LIMA, B. C. **Modelo de avaliação dos serviços de distribuição: proposta de indicadores para uma empresa do setor de eletroeletrônicos**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Elétrica)) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis.

LIMA, J. F. S. d. **A importância da Indústria 4.0 no Brasil: desafios e perspectivas**. 2023. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2023.

MACHADO, L. d. S. *et al.* Estudo e implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma residência. 098, 2022.

MACIEL, R. S. *et al.* Modelo multicritério para avaliação de desempenho de empresas incubadas. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, 2022. DOI: 10.5585/riae.v21i1.21253.

MAKAROVA, I. *et al.* The role of reverse logistics in the transition to a circular economy: Case study of automotive spare parts logistics. **FME Transactions**, 2021. DOI: 10.5937/fme2101173m.

MARR, B. **Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know**. [S.l.]: Pearson UK, 2012.

MIGUEL, P. A. C.; SOUSA, R. O Método do Estudo de Caso na Engenharia de Produção. *In*: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. cap. 6, p. 131–148. ISBN 978-85-352-4850-0.

MILLER, G. The development of indicators for sustainable tourism: Results of a Delphi survey of tourism researchers. Versão inglesa. **Tourism Management**, v. 22, n. 4, p. 351–362, 2001.

MULLEN, P. M. Delphi: Myths and reality. Versão inglesa. **Journal of Health Organization and Management**, v. 17, n. 1, p. 37–52, 2003. DOI: 10.1108/14777260310469319.

MUSHTAQ, B.; BANDH, S. A.; SHAFI, S. **Environmental management: environmental issues, awareness and abatement**. Singapura: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-3813-1.

NEOSOLAR ENERGIA. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 01 maio 2025.

NETO, G. F. **Gestão de Suprimentos e Logística**. Brasil: Freitas Bastos, 2022.

NI, Z.; CHAN, H. K.; TAN, Z. Systematic literature review of reverse logistics for e-waste: overview, analysis, and future research agenda. **International Journal of Logistics Research and Applications**, Taylor & Francis, v. 26, n. 7, p. 843–871, 2023. DOI: 10.1080/13675567.2021.1993159. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1993159>.

NIEDERBERGER, M.; SPRANGER, J. Delphi Technique in Health Sciences: A Map. **Frontiers in Public Health**, v. 8, 2020. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00457.

NYAMATHULLA, S.; CHITTATHURU, D. A review of multilevel inverter topologies for grid-connected sustainable solar photovoltaic systems. **Sustainability**, MDPI, v. 15, n. 18, p. 13376, 2023.

PAGE, M. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, 2020. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.

PIMENTEL, M. B. C. *et al.* Current Results and Main Challenges of the Implementation of the Electric Electronic Waste Reverse Logistics System in Brazil. **2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG)**, p. 1–8, 2024. DOI: 10.23919/EGG62010.2024.10631193.

RADZINSKI, A. P. N. *et al.* Performance Indicators of Reverse Logistics Systems: A Proposal For A Model Applied to the Brazilian Context. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Centro Universitário da FEI, Revista RGSA, v. 19, n. 2, p. 1–32, 2025.

RAYENS, M. K.; HAHN, E. J. Building consensus using the Policy Delphi method: Measuring degrees of consensus. Versão inglesa. **Policy, Politics, & Nursing Practice**, v. 1, n. 4, p. 308–315, 2000.

RENEWABLE-MATTERS. **Reverse Logistics: The Circular Economy's Weakest Link**. Acessado em: 16 de agosto de 2025. 2020. Disponível em: <https://www.renewablematter.eu/articles/article/reverse-logistics-the-circular-economy-weak-est-link>.

RODRIGUES, Â. C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil**. 2007. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista ...

ROUDBARI, E. S.; GHOMI, S. F. F.; SAJADIEH, M. S. Reverse logistics network design for product reuse, remanufacturing, recycling and refurbishing under uncertainty. **Journal of Manufacturing Systems**, 2021. DOI: 10.1016/J.JMSY.2021.06.012.

SAFFARI, A. A proposed framework of reverse logistics based on blockchain for auditing and traceability for e-equipment. **Preprint**, 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1941930/v1.

SAR, K.; GHADIMI, P. A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 177, p. 109011, 2023.

SARAH, K. E.; ROLAND, U.; EPHRAIM, N. A Review of Solar Photovoltaic Technologies. **International Journal of Engineering Research and**, 2020. DOI: 10.17577/ijertv9is070244.

SCHLEGELMILCH, B. Global Supply Chains. **Management for Professionals**, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90665-8_9.

SCHMALZ, U.; SPINLER, S.; RINGBECK, J. Lessons Learned from a Two-Round Delphi-based Scenario Study. **MethodsX**, v. 8, 2020. DOI: 10.1016/j.mex.2020.101179.

SHAH, N. *et al.* A review of third generation solar cells. **Processes**, MDPI, v. 11, n. 6, p. 1852, 2023.

SILVA, E.; MENEZES, E. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, R. Avaliação de Desempenho e Transação de Energia Elétrica numa Comunidade de Energia Baseada em Produção Solar Fotovoltaica, 2021.

SILVESTRE, L. **Avaliação do desempenho da economia circular em indústrias de alimentos: proposta de método e desenvolvimento de aplicativo**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SKUBIQ. **8 KPIs for Successful Reverse Logistics Process**. [*S.l.: s.n.*], 2024. Acesso em: 31 ago. 2025. Disponível em: <https://www.skubiq.com/de/blog/8-kpis-for-successful-reverse-logistics-process/>.

SLAM, M. R. I.; MONJUR, M. E. I.; AKON, T. Supply Chain Management and Logistics: How Important Interconnection Is for Business Success. **Open Journal of Business and Management**, 2023. DOI: 10.4236/ojbm.2023.115139.

SONAR, H. *et al.* Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, 2024. DOI: 10.1016/j.clscn.2024.100165.

SOUSA, N. M. D.; OLIVEIRA, C. B.; CUNHA, D. Photovoltaic Electronic Waste in Brazil: Circular Economy Challenges, Potential and Obstacles. **SSRN Electronic Journal**, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4254154.

SOUTH, L. *et al.* Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review. **Computer Graphics Forum**, v. 41, 2022. DOI: 10.1111/cgf.14521.

SOUZA, V.; FIGUEIREDO, A. M. R.; DOS SANTOS BORTOLOCCI ESPEJO, M. M. Challenges and strategies for managing end-of-life photovoltaic equipment in Brazil: Learning from international experience. **Energy Policy**, 2024. DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114091.

STAVINSKII, A.; KOSHKIN, D. Technical Solutions of Laminated Magnetic Cores of Transformers With Combination of Electrical Steel. *In*: PROCEEDINGS of the 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598810.

TADESSE, M. *et al.* Key Logistics Performance Indicators in Low-Income Countries: The Case of the Import–Export Chain in Ethiopia. **Sustainability**, 2022. DOI: 10.3390/su141912204.

TIBBEN-LEMBKE, R. S.; ROGERS, D. S. **Reverse Logistics: A Review of the Literature and Framework for Future Investigation**. [S.l.]: Journal of Business Logistics, 2002.

TUTZ, G. Hierarchical Models for the Analysis of Likert Scales in Regression and Item Response Analysis. **International Statistical Review**, v. 89, p. 18–35, 2020. DOI: 10.1111/insr.12396.

VARGAS, D. B.; CAMPOS, L. M.; LUNA, M. M. M. Brazil's Formal E-Waste Recycling System: From Disposal to Reverse Manufacturing. **Sustainability**, 2023. DOI: 10.3390/su16010066.

VIDROVÁ, Z. Supply chain management in the aspect of globalization. **SHS Web of Conferences**, 2020. DOI: 10.1051/shsconf/20207404031.

VIEIRA, B. O. *et al.* Multi-criteria methods applied in the studies of barriers identified in the implementation of reverse logistics of e-waste: A research agenda. **Logistics, MDPI**, v. 4, n. 2, p. 11, 2020.

VILLAZÓN, C. C. *et al.* Identification of Key Performance Indicators in Project-Based Organisations through the Lean Approach. **Sustainability**, 2020. DOI: 10.3390/su12155977.

WERNER, M. J. E. *et al.* Exploring Organizational Resilience Through Key Performance Indicators. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 38, p. 51–65, 2020. DOI: 10.1080/21681015.2020.1839582.

WIBOWO, M. *et al.* Reverse Logistics Performance Indicators for the Construction Sector: A Building Project Case. **Sustainability**, 2022. DOI: 10.3390/su14020963.

WILSON, M.; PASCHEN, J.; PITT, L. The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 33, n. 1, p. 9–25, 2022.

ZHANG, X. *et al.* A Review on Remanufacturing Reverse Logistics Network Design and Model Optimization. **Processes**, 2021. DOI: 10.3390/pr10010084.

Apêndices

APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTA ETAPA 2

Este apêndice apresenta o roteiro de entrevista utilizado na etapa 2 da pesquisa, aplicado ao setor de logística reversa de inversores fotovoltaicos da empresa estudada.

SETOR DE LOGÍSTICA REVERSA DE INVERSORES FOTOVOLTÁICOS

1. Qual a principal atividade do setor de logística reversa de inversores?
2. A atuação da empresa nesse segmento é regional, nacional ou internacional?
3. Qual o percentual de materiais ou componentes recuperados?
4. Qual a destinação de materiais cujo aproveitamento ou comercialização não seja possível?
5. Se possível, especificar quantidade ou volume aproximado de equipamentos/componentes comercializados/reciclados por mês.
6. Onde esses equipamentos são comercializados? Quais os clientes?
7. Existem barreiras às atividades? Como são contornadas?

EQUIPE ENVOLVIDA

Cargo	Quantidade	Função
Técnicos		
Montadores		
Líderes		
Analistas		

FLUXO DOS INVERSORES

1. Onde esses equipamentos são comercializados? Quais os clientes?
2. Quais os canais de chegada desses equipamentos?
3. Por quais áreas/processos o inversor passa?
4. Quais são as saídas possíveis?

INDICADORES DE DESEMPENHO

1. É utilizado algum tipo de indicador para esse processo?
2. Qual?
3. Quantos indicadores seria viável para acompanhamento?

APÊNDICE B – RODADA 1 DO MÉTODO DELPHI

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Esse Formulário tem como finalidade coletar opiniões de especialistas do setor de **logística reversa de inversores fotovoltaicos**.

As informações aqui coletada serão utilizadas exclusivamente para fins acadêmico, tendo como resultado um Trabalho de Conclusão de Curso. Sendo assim, atendendo o Código de Ética da pesquisa científica da Universidade, asseguramos que **não serão revelados os nomes das pessoas e nem o nome da empresa**.

* Indica uma pergunta obrigatória

1. Qual o seu cargo *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Técnico
- ☐ Montador
- ☐ Engenheiro
- ☐ Analista
- ☐ Acadêmico da área (Mestre, Doutor, Bacharel...)
- ☐ Outro: _____

2. Explicação 1: Neste questionário, entende-se **logística reversa** como o conjunto de atividades do retorno dos inversores fotovoltaicos após a venda — incluindo movimentação, armazenamento, reparo, remanufatura ou descarte adequado. Caso utilize outro termo no dia a dia, considere aquele que mais se aproxima dessa definição. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Entendi
- ☐ Não entendi

https://docs.google.com/forms/d/1IVdRQKZUgIqLk5NORR0nzUALN_T8SNhfXEWEY3y2iZ4/edit

1/10

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

3. Explicação 2: Um **indicador de desempenho** é uma medida utilizada para acompanhar os resultados de uma atividade, permitindo identificar pontos fortes, falhas e oportunidades de melhoria. *

Marcar apenas uma oval.

☐ Entendi

☐ Não entendi

Indicadores financeiros

Descrição dos indicadores que serão classificados abaixo:

Custos totais de logística reversa: soma de todos os custos de coleta, transporte, processamento e administrativos.

Multas e perdas: impacto financeiro de multas, produtos danificados ou obsoletos.

Retorno financeiro: valor recuperado por meio da remanufatura ou da revenda de equipamentos/peças.

Estabilidade financeira: capacidade da empresa em manter equilíbrio econômico diante de investimentos e riscos.

Custo da eletricidade: custo associado à geração de energia durante o ciclo de vida do produto.

4. Qual importância você atribui para esses indicadores *
- Utilize a escala de 1 a 5, em que **1 = Sem importância** e **5 = Imprescindível**

Marcar apenas uma oval por linha.

	1 - Sem importância	2 - Pouco importante	3 - Importância moderada	4 - Importante	5 - Imprescindível
Custos totais de logística reversa	☐	☐	☐	☐	☐
Multas e perdas	☐	☐	☐	☐	☐
Retorno financeiro	☐	☐	☐	☐	☐
Estabilidade financeira	☐	☐	☐	☐	☐
Custo da eletricidade	☐	☐	☐	☐	☐

5. Campo aberto para sugestão de indicador não citado acima, deixe vazio se não tiver.

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Indicadores operacionais

Descrição dos indicadores que serão classificados abaixo:

Eficiência operacional: produtividade do processo de logística reversa.

Taxa de retorno: percentual de produtos (inversores fotovoltaicos) retornados em relação às vendas.

Infraestrutura de coleta: número de veículos e pontos de coleta disponíveis.

Taxa de retorno por canal: quantidade de produtos retornados por cada canal em relação ao total vendido no mesmo canal.

Qualidade do serviço: quantidade de produtos que apresentam defeitos em relação ao total remanufaturado.

Giro de estoque: diferença entre o valor dos equipamentos que saem do estoque e o valor dos que entram.

Tempo de processamento: intervalo necessário para executar as atividades da logística reversa, desde a triagem até a destinação final.

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

6. Qual importância você atribui para esses indicadores *

Utilize a escala de 1 a 5, em que **1 = Sem importância** e **5 = Imprescindível***Marcar apenas uma oval por linha.*

	1 - Sem importância	2 - Pouco importante	3 - Importância moderada	4 - Importante	5 - Imprescindível
Eficiência operacional	☐	☐	☐	☐	☐
Taxa de retorno	☐	☐	☐	☐	☐
Infraestrutura de coleta	☐	☐	☐	☐	☐
Taxa de retorno por canal	☐	☐	☐	☐	☐
Qualidade do serviço	☐	☐	☐	☐	☐
Giro de estoque	☐	☐	☐	☐	☐
Tempo de processamento	☐	☐	☐	☐	☐

7. Campo aberto para sugestão de indicador não citado acima, deixe vazio se não tiver.

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Indicadores ambientais

Descrição dos indicadores que serão classificados abaixo:

Gestão de resíduos: toneladas de resíduos coletados, destinados ou evitados.

Reciclagem e reaproveitamento: percentual de materiais retornados que são reciclados ou reutilizados corretamente.

Redução de emissões de gases de efeito estufa: quantificação das emissões evitadas pelo sistema.

Impactos ambientais do ciclo de vida: efeitos que contribuem para aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade ao longo do ciclo de vida.

Uso de recursos naturais: consumo de água, solo, energia e matérias-primas.

Demanda atendida por energia solar: contribuição da energia solar para a demanda total.

Diversificação da energia: grau de diversificação da matriz energética.

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

8. Qual importância você atribui para esses indicadores *

Utilize a escala de 1 a 5, em que **1 = Sem importância** e **5 = Imprescindível**

Marcar apenas uma oval por linha.

	1 - Sem importância	2 - Pouco importante	3 - Importância moderada	4 - Importante	5 - Imprescindível
Gestão de resíduos	☐	☐	☐	☐	☐
Reciclagem e reaproveitamento	☐	☐	☐	☐	☐
Redução de emissões de gases de efeito estufa	☐	☐	☐	☐	☐
Impactos ambientais do ciclo de vida	☐	☐	☐	☐	☐
Uso de recursos naturais	☐	☐	☐	☐	☐
Demanda atendida por energia solar	☐	☐	☐	☐	☐
Diversificação da energia	☐	☐	☐	☐	☐

9. Campo aberto para sugestão de indicador não citado acima, deixe vazio se não tiver.

https://docs.google.com/forms/d/1IVdRQKZUglLk5NORR0nzUALN_T8SNhfXEWEY3y2iZ4/edit

7/10

Indicadores legais

Descrição dos indicadores que serão classificados abaixo:

Conformidade regulatória: atendimento a normas legais, certificações e especificações técnicas.

10. Qual importância você atribui para esses indicadores *
- Utilize a escala de 1 a 5, em que **1 = Sem importância** e **5 = Imprescindível**

Marcar apenas uma oval por linha.

	1 - Sem importância	2 - Pouco importante	3 - Importância moderada	4 - Importante	5 - Imprescindível
Conformidade regulatória	☐	☐	☐	☐	☐

11. Campo aberto para sugestão de indicador não citado acima, deixe vazio se não tiver.

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Indicadores sociais

Descrição dos indicadores que serão classificados abaixo:

Saúde: condições de trabalho, ergonomia e práticas de ginástica laboral.

Segurança: número de acidentes e condições de trabalho.

Responsabilidade social: programas sociais, reputação e relações comunitárias.

Desenvolvimento humano: número de capacitações e treinamentos promovidos.

Satisfação dos clientes: quantidade de opiniões negativas dos clientes (internos e externos).

Empregos criados: número de empregos diretos e indiretos gerados.

12. Qual importância você atribui para esses indicadores *

Utilize a escala de 1 a 5, em que **1 = Sem importância** e **5 = Imprescindível**

Marcar apenas uma oval por linha.

	1 - Sem importância	2 - Pouco importante	3 - Importância moderada	4 - Importante	5 - Imprescindível
Saúde	☐	☐	☐	☐	☐
Segurança	☐	☐	☐	☐	☐
Responsabilidade social	☐	☐	☐	☐	☐
Desenvolvimento humano	☐	☐	☐	☐	☐
Satisfação dos clientes	☐	☐	☐	☐	☐
Empregos criados	☐	☐	☐	☐	☐

22/09/2025, 12:57

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

13. Campo aberto para sugestão de indicador não citado acima, deixe vazio se não tiver.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE C – RODADA 2 DO MÉTODO DELPHI

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Esse Formulário tem como finalidade coletar opiniões de especialistas do setor de **logística reversa de inversores fotovoltaicos**.

As informações aqui coletada serão utilizadas exclusivamente para fins acadêmico, tendo como resultado um Trabalho de Conclusão de Curso. Sendo assim, atendendo o Código de Ética da pesquisa científica da Universidade, asseguramos que **não serão revelados os nomes das pessoas e nem o nome da empresa**.

* Indica uma pergunta obrigatória

1. Qual o seu cargo *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Técnico
- ☐ Montador
- ☐ Engenheiro
- ☐ Analista
- ☐ Acadêmico da área (Mestre, Doutor, Bacharel...)
- ☐ Outro: _____

2. Você respondeu o primeiro questionário desta pesquisa? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Sim
- ☐ Não

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

3. Esse questionário avaliará quais indicadores de desempenho resultados do questionário anterior se aplicam à realidade da logística reversa de inversores na sua empresa. *

Leia a fórmula de cálculo de cada indicador e avalie se é aplicável ou não à sua realidade, pensando nos recursos disponíveis como: tempo, colaboradores, materiais, dados, investimentos monetários.

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Entendi
- ☐ Não Entendi

Indicadores financeiros

Método básico de cálculo dos indicadores:

Custos totais de logística reversa = custo de coleta + custo de transporte + custo de processamento + custo administrativo

Multas e perdas = despesas com multas + perdas por produtos danificados + perdas por produtos obsoletos

Retorno financeiro = valor da revenda de equipamentos + valor da revenda de peças reaproveitadas

Estabilidade financeira = receita da logística reversa ÷ custos da logística reversa

4. Esses indicadores são aplicáveis no seu setor? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Sim	Parcialmente	Não
Custos totais de logística reversa	☐	☐	☐
Multas e perdas	☐	☐	☐
Retorno financeiro	☐	☐	☐
Estabilidade financeira	☐	☐	☐

5. Campo aberto para observações sobre as respostas

Indicadores operacionais

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Método básico de cálculo dos indicadores:

Eficiência operacional = quantidade de produtos processados ÷ tempo ou recursos utilizados

Taxa de retorno = quantidade de produtos retornados ÷ quantidade vendida × 100

Infraestrutura de coleta = número de veículos + número de pontos de coleta

Qualidade do serviço = quantidade de produtos com defeito ÷ total remanufaturado × 100

Giro de estoque = valor de produtos que saem do estoque – valor de produtos que entram no estoque

Tempo de processamento = data/hora de conclusão – data/hora de início

6. Esses indicadores são aplicáveis no seu setor? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Sim	Parcialmente	Não
Eficiência operacional	☐	☐	☐
Taxa de retorno	☐	☐	☐
Infraestrutura de coleta	☐	☐	☐
Qualidade do serviço	☐	☐	☐
Giro de estoque	☐	☐	☐
Tempo de processamento	☐	☐	☐

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

7. Campo aberto para observações sobre as respostas

Indicadores ambientais

Método básico de cálculo dos indicadores:

Gestão de resíduos = resíduos coletados + resíduos destinados + resíduos evitados**Reciclagem e reaproveitamento** = materiais reciclados ou reutilizados ÷ materiais retornados × 100**Impactos ambientais do ciclo de vida** = soma dos efeitos ambientais do ciclo de vida**Uso de recursos naturais** = água + solo + energia + matérias-primas**Demanda atendida por energia solar** = energia solar ÷ demanda total × 100

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

8. Esses indicadores são aplicáveis no seu setor? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Sim	Parcialmente	Não
Gestão de resíduos	☐	☐	☐
Reciclagem e reaproveitamento	☐	☐	☐
Impactos ambientais do ciclo de vida	☐	☐	☐
Uso de recursos naturais	☐	☐	☐
Demanda atendida por energia solar	☐	☐	☐

9. Campo aberto para observações sobre as respostas

Indicadores legais

Método básico de cálculo dos indicadores:

Conformidade regulatória = atendimento a normas legais + certificações + especificações técnicas

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

10. Esses indicadores são aplicáveis no seu setor? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Sim	Parcialmente	Não
Conformidade regulatória	☐	☐	☐

11. Campo aberto para observações sobre as respostas

Indicadores sociais

Método básico de cálculo dos indicadores:

Saúde = condições de trabalho + ergonomia + práticas de ginástica laboral**Segurança** = número de acidentes + condições de trabalho**Responsabilidade social** = programas sociais + reputação + relações comunitárias**Satisfação dos clientes** = quantidade de opiniões negativas

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

12. Esses indicadores são aplicáveis no seu setor? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Sim	Parcialmente	Não
Saúde	☐	☐	☐
Segurança	☐	☐	☐
Responsabilidade social	☐	☐	☐
Satisfação dos clientes	☐	☐	☐

13. Campo aberto para observações sobre as respostas

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

25/09/2025, 20:17

Indicadores de desempenho na logística reversa de inversores fotovoltaicos

Fonte: Elaboração própria.

Anexos

ANEXO A – INDICADORES DE DESEMPENHO LOGÍSTICO

Table 1 KPIs observed throughout the Literature Review

Ability to deal with returns	Flexibility to changes	Product configuration
Accounts receivable turnover	Geographical location	Purchase order cycle time
Accuracy of forecasting	Government satisfaction	Quality of delivery documentation
Accurate billing	Interest coverage ratio	Quality system certifications
Accurate documentation	Inventory accuracy	Quality when receiving goods in the warehouse
Advance notice on shipping delays	Inventory days of supply	Receiving and assessing of return shipments
Advance shipment notification	Inventory management and registration	Relationships with other stakeholders
Asset turns	Inventory turn-around times	Research and development capability
Available stock level	Investor (financier) satisfaction	Response accuracy
Backorder/stock-outs	IT Infrastructure	Response time to inquiries
Building product displays	Labor cost	Responsiveness to changes
Cash flow	Labor efficiency	Return on investments
Cash-to-cash cycle time	Lead time	Return processing cost
Circumstance of delivery	Loss/damage experience	Revenue growth
Community satisfaction	Management accounting techniques	Right equipment supplied
Complete orders	Managerial skills	Sales force complaints
Cost	Market share	Sales force feedback
Cost of returned goods	Non-government organization satisfaction	Sales growth
Cultural match	Number of customer complaints	Shipping error
Customer complaints handling	Number of customer returns	Shipping/transportation Cost
Customer inquiry response	Number of dollars shipped	Social media usage for brand building
Customer satisfaction	Number of dollars/unit shipped	Stock-holding cost
Customer service level	Number of kilos/units shipped	Supplier base size
Delivery defect	Number of shipments per vehicle-mile	Supplier reliability
Delivery reliability	On-time pick-up	Supplier satisfaction
Delivery security	On-time shipment-delivery	The transport and warehouse capacity utilization
Educated employee	Order accuracy	Timeliness
Effectiveness in distribution operations	Order entry methods	Total / overall satisfaction
Effectiveness of delivery invoice methods	Order procedure convenience	Total logistics management costs
Emergency shipping	Overhead cost	Total order cycle time
Employee satisfaction	Packaging activities	Total Supply chain cycle time
Environmental awareness/understanding	Past performance	Transport capacity
Environmental group satisfaction	Perceived quality	Value added cost
Equipment cleanliness	Perceived value of product	Value-added activities
Equity ratio	Personnel attitude	Warehouse capacity
Ethical responsibility	Picking/shipping accuracy	Warehouse cycle time
Fill rates	Process cycle time	Warehouse labor productivity
Financial perspective-profitability	Product and service variety	Warranty cost
	Product clarity	Willingness for information sharing

Fonte: Gozacan-Chase e Lafçı (2020)