

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO,**  
**TECNOLOGIAS E SOCIEDADE**

**SÉRGIO ASSIS MACHADO**

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INOVAÇÃO FRUGAL, DAS TELHAS DE  
PEAD RECICLADO COM GRAFENO, E PAINÉIS SOLARES SOB A  
ÓTICA DA TECNOCIÊNCIA**

**SÉRGIO ASSIS MACHADO**

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INOVAÇÃO FRUGAL, DAS TELHAS DE  
PEAD RECICLADO COM GRAFENO, E PAINÉIS SOLARES SOB A  
ÓTICA DA TECNOCIÊNCIA**

**ITAJUBÁ/MG**

**2025**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade da Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI, como requisito necessário para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade.

**Área de concentração:** Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade

**Linha de pesquisa:** Desenvolvimento e Tecnologias

**Orientador:** Prof.º Drº Rosinei Batista Ribeiro

(Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI)

**Coorientador:** Prof.º Drº Adilson da Silva Mello

(Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI)

SÉRGIO ASSIS MACHADO

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INOVAÇÃO FRUGAL, DAS TELHAS DE  
PEAD RECICLADO COM GRAFENO, E PAINÉIS SOLARES SOB A  
ÓTICA DA TECNOCIÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade da Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade. Versão apresentada para a banca de defesa.

Área de concentração: Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Tecnologias

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof.º Drº Rosinei Batista Ribeiro - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Coorientador: \_\_\_\_\_

Profº Drº Adilson da Silva Mello – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Examinador: \_\_\_\_\_

Prof.º Drº Carlos Alberto Máximo Pimenta– Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Examinador: \_\_\_\_\_

Prof.º Drº Francisco Del Moral Hernandez – Coordenação Geral de Pós-graduação, Extensão e Pesquisa – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – CGPEP – CEETEPS

Itajubá, 13 de outubro de 2025.

## FICHA CATALOGRÁFICA

*Aos meus pais, Antonio dias Machado  
e Alice de Assis Machado,  
a minha irmã Selma Assis Machado  
Por não me deixar desistir, dos meus sonhos  
Ao amigo Rosinei Batista Ribeiro, pela motivação e inspiração.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores do Dtecs, por compartilhar conhecimento de forma transformadora, capaz de me fazer enxergar além das “coisas”, e ver a humanidade presente.

Em especial aos Professores: Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro, Prof. Dr. Adilson da Silva Mello, Prof. Dr. Carlos Alberto Máximo Pimenta, Prof. Dr. Francisco Del Moral Hernandez, pois, como dizem, “o conhecimento transforma”, mas a alma do conhecimento são as pessoas, que são vias de condução e inspiração, onde uma palavra bem colocada, ou cinco minutos de conversa, pode trazer aprendizado para uma vida.

Para chegar até aqui encontrei anjos, que me tiraram da inércia; que me acolheu ao subir a escada, que me assistiu na sala de aula, e quando pensei que tinha acabado, ao meu lado ainda existia; brancos, negros, morenos e loiros, eles estavam lá, e ainda estão, são inspiração.

Aos colegas do PPG DTECS-UNIFEI, o conhecimento não se faz sozinho, e o compartilhar de conhecimento foi enriquecedor.

Obrigado pelo prazer de poder assistir e participar de explicações brilhante das meninas e colegas amigos, e poder aprender muito com vocês, artigos, apresentações, e reflexões inteligentes, de diferentes formações, jornalistas, psicólogas, professoras, advogados, enfermeiras, engenheiros, arquitetos, médicas... Cientistas; o multidisciplinar, “tudo junto e misturado”, fazendo entender a primeira palavra ouvida no PPG DTECS-UNIFEI, citada por uma colega, “Epistemologia” mais que conhecimento ou título, aqui, encontrei pessoas que se, fazem refletir, sobre objetos, coisas, atitudes e pontos de vistas, reflexões, que são capazes de moldar a Sociedade, impulsionar o Desenvolvimento e incentivar a busca por Tecnologia e conhecimento, de forma mais humanizada.

## RESUMO

A pesquisa surge, em um universo de estudos, que visa abordar a utilização do Grafeno em um contexto social, ambiental e tecnológico, de forma multidisciplinar, por um viés de desenvolvimento com inclusão social, frente a escassez de estudos relacionados ao Grafeno no contexto social. O objetivo do estudo é analisar a aplicação de telhas de PEAD reciclado com Grafeno em relação aos Painéis Solares, por meio de uma visão de Inovação Frugal, baseada na Tecnociência, com o propósito de produzir energia limpa e acessível, e inclusiva, a uma maior parcela da população, sem desconsiderar a existência de atores, humanos e não humanos, que interagem em forma de rede complexa, descentralizada, e que gera influencia no processo de desenvolvimento, assim como versado por Latour(1996) sobre a teoria, “Ator Rede”. Em busca na base SCOPUS® (2025) utilizando as palavras chaves “Grafeno social” foi possível encontrar no período de 2010 a 2024; 728 publicações, dentro de um universo de 273,209 publicações, sobre o Grafeno, seja no contexto, social, tecnológico e sustentável. Estudos ao redor do mundo sobre o Grafeno, estão em crescente, devido as propriedades, e características especiais, presentes, no material que ao ser adicionado a outros materiais, como aditivo, confere a estes, melhora em suas propriedades. O Brasil se destaca por ser o segundo maior produtor de grafite do mundo, com reservas no norte de Minas Gerais e na Bahia, minério do qual, de forma primária, pode ser extraído o Grafeno. Para a análise, foi utilizada a metodologia de pesquisa, Designer Science Research (DSR) de forma comparativa, a fim de avaliar a capacidade de Inovação frugal das Telhas de PEAD(Polietileno de alta Densidade) reciclado, com Grafeno, diante de Painéis Solares, e verificar se esta inovação tecnológica, de potencial social, contribui para a preservação dos recursos naturais, sustentabilidade, inclusão social e desenvolvimento, por meio da comparação energética, e confronto, com as controvérsias, existentes entre os painéis solares, e as telhas geradoras de energia, de PEAD reciclado com Grafeno, por meio do confronto com os pontos críticos sobre Tecnociência, apresentados por Dagnino, afim de verificar se as telhas de PEAD reciclado com Grafeno, podem se apresentar como um artefato de Inovação Frugal, atendendo a critérios Tecnocientíficos, maximizando o uso de materiais, como o PEAD, e o Grafeno, um alótropo do carbono, que com os avanços tecnológicos pode ser reciclado. A pesquisa mostra que as telhas de PEAD reciclado com Grafeno, têm potencial para gerar “energia limpa”, com matéria prima reciclada, proporcionando geração de renda, e de forma inclusiva, à medida que é capaz de atender as necessidades energéticas de uma maior parcela de consumidores, devido ao seu menor custo, sobretudo aqueles que tem menor poder aquisitivo e seriam os maiores beneficiados, com a geração e redução da tarifa de energia, por outro ponto, estaria também contribuindo para o fortalecimento energético e ambiental no país, atendendo aos objetivos sustentáveis, inclusivos e energéticos, definidos pela ONU, por meio dos Objetivos Sustentáveis, ODS.

**Palavras-chave:** Inovação Frugal; Tecnociência; PEAD; Grafeno; Tecnologias Sociais; Interdisciplinalidade; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The research emerges from a universe of studies that aims to address the use of graphene in a social, environmental, and technological context, in a multidisciplinary manner, from a development perspective with social inclusion, given the scarcity of studies related to graphene in the social context. The objective of the study is to analyze the application of recycled HDPE tiles with graphene in relation to solar panels, through a vision of frugal innovation, based on technoscience, with the purpose of producing clean, affordable, and inclusive energy for a larger portion of the population, without disregarding the existence of actors, human and non-human, who interact in the form of a complex, decentralized network, and which generates influence in the development process, as discussed by Latour (1996) on the theory, "Actor Network". A search in the SCOPUS® database (2025) using the keywords "social graphene" revealed the period from 2010 to 2024; 728 publications, within a universe of 273,209 publications, on graphene, in its social, technological, and sustainable context. Studies on graphene around the world are growing due to the material's special properties and characteristics, which, when added to other materials as an additive, improve their properties. Brazil stands out for being the second largest producer of graphite in the world, with reserves in the north of Minas Gerais and Bahia, a mineral from which, in a primary form, Graphene can be extracted. For the analysis, the research methodology, Designer Science Research (DSR) was used in a comparative way, in order to evaluate the frugal innovation capacity of recycled HDPE (High Density Polyethylene) tiles, with Graphene, compared to Solar Panels, and to verify if this technological innovation, with social potential, contributes to the preservation of natural resources, sustainability, social inclusion and development, through energy comparison, and confrontation, with the controversies, existing between solar panels, and energy-generating tiles, made of recycled HDPE with Graphene, through the confrontation with the critical points on Technoscience, presented by Dagnino, in order to verify if recycled HDPE tiles with Graphene, can present themselves as an artifact of Frugal Innovation, meeting Technoscientific criteria, maximizing the use of materials, such as HDPE, and Graphene, an allotrope of carbon, which with technological advances can be recycled. The research shows that recycled HDPE tiles with Graphene have the potential to generate "clean energy" with recycled raw materials, providing income generation, and in an inclusive way, as it is able to meet the energy needs of a larger portion of consumers, due to its lower cost, especially those with lower purchasing power and who would be the greatest beneficiaries, with the generation and reduction of energy tariffs. On the other hand, it would also be contributing to the energy and environmental strengthening in the country, meeting the sustainable, inclusive and energy objectives, defined by the UN, through the Sustainable Goals, SDGs.

**Keywords:** Frugal Innovation; Technoscience; HDPE; Graphene; Social Technologies; Interdisciplinarity, Sustainability.

## LISTA DE FIGURA

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> – Objetivo para o Desenvolvimento Sustentável.....                                  | 8  |
| <b>Figura 2</b> – Barreiras para Inovação Social.....   | 12 |
| <b>Figura 3</b> – Exemplos de Práticas para Inovação Social.....                                    | 14 |
| <b>Figura 4</b> – Jugaad Innvacion.....   | 19 |
| <b>Figura 5</b> – Tata Nano.....  | 20 |
| <b>Figura 6</b> – Mochilink.....  | 21 |
| <b>Figura 7</b> – Unidade Móvel de Jornalismo.....  | 21 |
| <b>Figura 8</b> – Definição de Inovação Frugal em Diferentes Níveis.....                            | 21 |
| <b>Figura 9</b> – Definições Institucionais de Inovação Frugal.....                                 | 22 |
| <b>Figura 10</b> – Pensando em Inteligência Artificial.....   | 27 |
| <b>Figura 11</b> - Características e elementos presentes em iniciativas de tecnologias sociais..... | 35 |
| <b>Figura 12</b> – Princípios do Desenvolvimento Sustentável.....                                   | 44 |
| <b>Figura 13</b> – Áreas de Importância das ODS.....  | 45 |
| <b>Figura 14</b> – Economia Circular.....   | 48 |
| <b>Figura 15</b> – Características e funcionalidades dos Produtos.....                              | 52 |
| <b>Figura 16</b> - Distinção e analogia entre aspectos fisiológicos e psicológicos.....             | 52 |
| <b>Figura 17</b> – Propriedades do Grafeno.....   | 56 |
| <b>Figura 18</b> – Estrutura do Grafite.....  | 57 |
| <b>Figura 19</b> - Estrutura de grafite, óxido de Grafeno.....                                      | 58 |
| <b>Figura 20</b> - Aplicação do Grafeno conforme a estrutura.....                                   | 58 |
| <b>Figura 21</b> – Classificação da Pesquisa.....   | 68 |
| <b>Figura 22</b> – Telha de PEAD com Grafeno.....   | 73 |

**Figura 23** – Paine Solar.....73

**Figura 24** - Fortalecimento de Cooperativas.....81

## **LISTA DE GRÁFICOS**

**Gráfico 1** – Publicação Mundial sobre Grafeno.....3

**Gráfico 2** - Origem de aquisição de matéria prima por recicladores no Brasil.....80

**Gráfico 3** - Índice de Reciclagem de Plástico Pós consumo no Brasil.....82

## LISTA DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| <b>Quadro 1</b> - Definições de Inovação Social segundo a Literatura.....                            | 10. |
| <b>Quadro 2</b> - Tipos de Inovação Social.....  | 12  |
| <b>Quadro 3</b> - Conceitos, autores, contribuições e características de Inovação Frugal.....        | 23  |
| <b>Quadro 4</b> - Razões para investir em inovação frugal.....                                       | 26  |
| <b>Quadro 5</b> - Principais, Fatores Críticos para o Sucesso.....                                   | 29  |
| <b>Quadro 6</b> - Críticas a Tecnociência, Segundo autores.....                                      | 38  |
| <b>Quadro 7</b> - Características do PEAD.....   | 54  |
| <b>Quadro 8a</b> - Aplicações do Grafeno.....  | 59  |
| <b>Quadro 8b</b> - Aplicações do Grafeno.....  | 60  |
| <b>Quadro 9</b> - Aplicações e Utilidades do Grafeno.....  | 61  |
| <b>Quadro 10</b> - Controvérsias e Impactos presentes do Grafeno.....                                | 62  |
| <b>Quadro 11</b> - Comparativo de Pesquisa de Artefatos usando o Método Design Science Research..... | 70  |
| <b>Quadro 12</b> - Aplicação do DSR no artefato de estudo.....                                       | 72  |
| <b>Quadro 13</b> - Relação entre Inovação Frugal e Tecnociência.....                                 | 76  |
| <b>Quadro 14</b> - Comparação entre as Telhas e a Tecnociência Solidária.....                        | 78  |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Estimativa de Massa de PEAD.....                          | 64 |
| <b>Tabela 2</b> - Estimativa em Massa de Grafeno.....                       | 64 |
| <b>Tabela 3</b> - Características da telha e do painel solar utilizado..... | 74 |
| <b>Tabela 4</b> - Resultados Energia e Custo.....                           | 83 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 1.1. Pergunta de Pesquisa.....   | 2  |
| 1.2. Justificativa.....  | 3  |
| 1.3. Objetivo Geral.....   | 5  |
| 1.4. Objetivo Específico.....  | 5  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 6  |
| 2.1. Inovação.....   | 6  |
| 2.2. Inovação Social.....  | 7  |
| 2.2.1. Características de Inovação Social.....   | 14 |
| 2.3. Inovação Frugal.....  | 17 |
| 2.4. Controvérsias sociotécnicas das telhas.....   | 32 |
| 2.5. Tecnologia.....   | 33 |
| 2.6. Tecnologias Sociais.....  | 34 |
| 2.7. Tecnociência.....   | 36 |
| 2.8. Desenvolvimento e Inclusão Social.....  | 39 |
| 2.9. Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável.....   | 43 |
| 2.10. Economia Circular.....   | 47 |
| 2.11. As telhas de PEAD reciclado com grafeno, inovação frugal, sustentável e circular.....                          | 50 |
| 2.12. Seleção de Materiais.....  | 51 |
| 2.13. Polímero de Alta Densidade (PEAD).....   | 53 |
| 2.14. Grafeno.....   | 54 |
| 2.14.1 Método de Produção.....   | 59 |
| 2.15. Caracterização da Telha de PEAD Reciclado com Grafeno.....   | 63 |
| 2.16. Controvérsias sobre os Painéis Solares.....  | 64 |
| 3. METODOLOGIA.....  | 67 |
| 3.1. Material e Método.....  | 67 |
| 3.2. Metodologia DSR.....  | 69 |
| 3.3. Análise Comparativa de Desempenho Energético e Econômico.....   | 73 |
| 3.4. Relação entre Inovação Frugal, Tecnociência e seu objetivo solidário.....                                       | 75 |
| 3.5. Perspectivas do Artefato como Tecnologia Social: Valorização dos Impactos Econômicos, Sociais e Ambientais..... | 78 |
| 4. RESULTADOS.....   | 83 |
| 4.1 Discussão dos Resultados.....  | 85 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 87 |
| REFERÊNCIAS.....   | 89 |

# 1. INTRODUÇÃO

Diante das contradições do modelo capitalista e das inconsistências observadas nos processos de desenvolvimento, o mundo contemporâneo busca práticas que preservem a vida e o planeta, garantindo condições adequadas para as próximas gerações. Tais práticas, pautadas na sustentabilidade, visam reduzir desigualdades e promover um desenvolvimento mais equilibrado.

Nesse cenário, os artefatos tecnológicos podem atuar como agentes de inclusão social e de transformação, uma vez que envolvem a criação e a aplicação de ferramentas e práticas voltadas para a igualdade de oportunidades e a participação ativa de todos os indivíduos na sociedade.

Nesse contexto, os painéis solares e as telhas geradoras de energia, como as telhas de PEAD reciclado com grafeno, emergem como alternativas para a produção de energia limpa e sustentável. Essas telhas apresentam-se como opção aos materiais convencionais e aos painéis solares, oferecendo uma solução de menor custo, inclusiva e ambientalmente responsável.

O grafeno, ao ser incorporado ao PEAD reciclado, confere maior resistência e durabilidade ao artefato, que pode atingir até 80 anos de vida útil. Além disso, possibilita a geração de energia a um custo até 40% inferior ao dos painéis solares tradicionais, cuja vida útil é de aproximadamente 25 anos, com perda progressiva de eficiência (ROCHA; RIBEIRO, 2022).

A utilização do PEAD reciclado contribui para a economia de recursos naturais, uma vez que, para cada 1 kg de PEAD reciclado, economiza-se cerca de 1,75 kg de petróleo. Dessa forma, as telhas se apresentam como alternativa sustentável tanto pelo reaproveitamento de resíduos plásticos quanto pela produção de energia limpa.

Considerando essas características, a pesquisa tem como objetivo avaliar se as telhas de PEAD reciclado com grafeno podem ser classificadas como um produto de inovação frugal, isto é, uma forma de “fazer mais com menos” (PRABHU, 2012). Nesse sentido, busca-se verificar se essa tecnologia pode atender aos princípios da tecnociência solidária, quando confrontada com os pontos críticos apresentados por Dagnino em sua crítica à tecnociência tradicional.

Diante desse contexto, as telhas de PEAD reciclado com grafeno podem ser compreendidas também como um produto de inovação social, com características tecnocientíficas que possibilitam atender a necessidades sociais específicas. Segundo Latour (2012), um produto, bem ou serviços

podem ser transformados no processo produtivo pela ação de atores sociais, resultando em melhorias qualitativas ou quantitativas que respondam a demandas concretas.

Assim, a adoção dessas telhas representa uma iniciativa com apelo social relevante, capaz de otimizar recursos materiais e energéticos, reduzir custos e ampliar a inclusão social. Sua análise é conduzida pela metodologia Design Science Research (DSR), que permite comparar características técnicas e eficiência energética, relacionando o artefato à perspectiva da inovação frugal e da tecnociência.

Por fim, a pesquisa também dialoga com estudos relacionados ao uso do grafeno em prol da sustentabilidade e do desenvolvimento social, tecnológico e ambiental. O objetivo central é analisar os artefatos por meio de uma abordagem de inovação frugal baseada na tecnociência, com vistas à produção de energia limpa, acessível e inclusiva para uma parcela maior da população.

Nesse processo, identificam-se relações diretas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU, em especial: o ODS 7 (Energia acessível e limpa), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 10 (Redução das desigualdades), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima).

## **1.1 Pergunta de Pesquisa**

De que maneira as telhas de PEAD reciclado com grafeno podem ser avaliadas como um artefato de inovação frugal, no contexto da tecnologia social e da tecnociência, em comparação aos painéis solares, considerando aspectos de custo, sustentabilidade, inclusão social e geração de energia?

## 1.2 Justificativa

A pesquisa justifica-se pela escassez de estudos que tratem do grafeno em um contexto social, ao mesmo tempo em que cresce a produção científica sobre suas propriedades e aplicações tecnológicas. Embora existam milhares de publicações sobre o material, poucas abordam suas potencialidades, em um ambiente de inovação, voltado ao desenvolvimento inclusivo e sustentável, o que abre espaço para investigações voltadas a soluções sociais e ambientais.

Uma busca na base Scopus (2025) revelou que, em um universo de 273.209 publicações sobre grafeno, apenas 728 utilizaram como palavra-chave a expressão “*graphene and social*”. Esse dado evidencia a lacuna existente entre os avanços tecnológicos do material e sua aplicação em processos de inovação social, inclusiva e sustentável, reforçando a relevância desta pesquisa.

**Gráfico 1:** Publicação Mundial sobre Grafeno e suas repercussões



Fonte: Base SCOPUS® (2025)

No contexto do desenvolvimento sustentável, torna-se necessário adotar metodologias e teorias interdisciplinares, capazes de integrar diferentes campos do conhecimento. Como destacam Carvalho, Pimenta e Oliveira (2018), a complexidade dos problemas ambientais e sociais exige abordagens que transcendam fronteiras disciplinares, permitindo soluções híbridas e mais eficazes.

A escolha pelas telhas de PEAD reciclado com grafeno como objeto de análise decorre de sua capacidade de aliar inovação tecnológica, sustentabilidade e inclusão social. Essas telhas, além de durarem até 80 anos, possibilitam a geração de energia elétrica, contrastando com os painéis solares que, embora eficientes, apresentam vida útil menor, cerca de 30 anos, e perda de rendimento de 5% ao longo do tempo (ROCHA; RIBEIRO, 2022; LEE et al., 2020).

Desta forma, o estudo vem, utilizar o Grafeno, elemento protagonista, no artefato, Telhas de PEAD recicladas com Grafeno, a fim de revelar o conteúdo interdisciplinar existente no artefato, e tornado-se, relevante seu estudo de maneira social, no departamento de Pós Graduação em Desenvolvimento Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal de Itajubá.

Para tanto, a pesquisa faz a comparação entre artefatos: Telhas de PEAD com Grafeno, que podem durar até 80 anos, e gerar energia elétrica, enquanto telhas convencionais tem durabilidade de 30 anos, (Rocha; Ribeiro, 2022), e Painéis Solares, com durabilidade de 25 a 30 anos e capacidade de geração de energia, com perda de eficiência de 5% ao ano (National Renewable Energy Laboratory), NREL (LEE et. al, 2020).

A pesquisa busca, assim, verificar se esse artefato pode ser classificado como uma inovação frugal, ou seja, uma forma de “fazer mais com menos”, capaz de oferecer benefícios sociais, econômicos e ambientais. Essa abordagem permite relacionar a proposta à tecnociência solidária, nos termos de Dagnino (2008), ao considerar ciência e tecnologia como instrumentos de inclusão produtiva e social.

O Brasil, segundo maior produtor mundial de grafite, dispõe de condições estratégicas para avançar em pesquisas com grafeno, aproveitando suas reservas localizadas principalmente, ao norte de Minas Gerais e na Bahia. Esse cenário favorece a exploração de soluções que unam inovação tecnológica, sustentabilidade e acessibilidade, com redução de custo, inclusão social, reforçando a pertinência desta investigação.

Por fim, a relevância social da pesquisa está associada à possibilidade de ampliar o acesso à energia a um menor custo, sobretudo para populações de baixa renda. Ao possibilitar redução tarifária e inclusão de consumidores pela Tarifa Social, as telhas de PEAD reciclado com grafeno contribuem não apenas para o fortalecimento da matriz energética brasileira, mas também para a promoção de justiça social e ambiental.

### **1.3 Objetivos Geral**

Avaliar o potencial das telhas de PEAD reciclado com grafeno como uma proposta de Inovação Frugal aplicada à Tecnologia Social, considerando sua viabilidade econômica, ambiental, tecnológica e social, em relação às alternativas convencionais de geração de energia solar.

### **1.4 Objetivos Específicos**

1. Identificar os fundamentos que relacionam as telhas de PEAD reciclado com grafeno à inovação frugal e à tecnociência, destacando seu potencial como tecnologia social, com geração de energia, renda e inclusão social.
2. Estimar a capacidade de geração de energia das telhas de PEAD reciclado com grafeno e comparar seu desempenho e custo com painéis solares convencionais.
3. Correlacionar as críticas a tecnociência com o modelo proposto por Dagnino, relacionando-as à inovação frugal e à aplicação das telhas de PEAD reciclado com grafeno.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Inovação**

No contexto mundial, a inovação e a sustentabilidade desempenham papel fundamental no desenvolvimento da sociedade (NABARRETO et al., 2021). Segundo Rocha (2022), os avanços das ciências e das técnicas exigem a combinação de saberes, práticas e fundamentos tecnológicos para a resolução dos problemas atuais, assegurando a continuidade do processo inovador.

Kristmann (2014) compreende a inovação como a criação de modelos, teorias, símbolos, conceitos, produtos, processos e sistemas que não existiam previamente, diferenciando-se para beneficiar a sociedade por meio da geração do novo. Para que a inovação contribua efetivamente para a sustentabilidade, os benefícios resultantes devem ser significativos e não negligenciáveis nas dimensões social, econômica e ambiental, podendo constituir fator competitivo relevante para empresas e objeto de interesse de pesquisadores (REINALDO; PINTO, 2023).

De acordo com Fleury et al. (2020), a inovação corresponde ao processo de criação, desenvolvimento e implementação de novos produtos, processos ou modelos de negócio, com o objetivo de gerar valor econômico e social. Os autores destacam que, no contexto brasileiro, a inovação deve considerar as especificidades do mercado local, bem como as condições econômicas e sociais do país.

Para Nader e Azevedo (2022), inovar significa explorar novas ideias e obter sucesso na transformação em produtos, serviços ou negócios com valor reconhecido no mercado, razão pela qual a inovação ocupa lugar estratégico nos planos de grandes empresas. Nesse sentido, Arrighi (1998) argumenta que o capitalismo tende a gerar inovações capazes de romper com ordens previamente estabelecidas.

Sob uma perspectiva evolucionária, Branco (2020) complementa que essas inovações emergem de contextos econômicos marcados pelo desequilíbrio, nos quais a destruição de estruturas antigas dá origem ao novo. Uma inovação de produto, por exemplo, consiste na introdução de bens ou serviços novos ou significativamente aprimorados, englobando melhoramentos em especificações técnicas, componentes, materiais, softwares incorporados, usabilidade ou outras características funcionais.

Nesse cenário, a inovação tecnológica adquire relevância crescente, pois se apresenta como meio para alcançar sucesso e diferencial competitivo. Paralelamente, o desenvolvimento de tecnologias orientadas à sustentabilidade busca conciliar as dimensões ambiental, social e econômica. Como destaca Silva (2023), a inovação tecnológica deve integrar crescimento econômico, responsabilidade social e respeito ambiental, configurando-se como modelo de desenvolvimento sustentável.

## **2.2 Inovação Social**

A inovação social pode ser entendida como uma resposta a necessidades ou problemas sociais específicos, representando um valor compartilhado que resulta da colaboração entre diferentes atores e da interação em atividades coletivas (FEITOSA; SANO; RAMOS, 2022).

O termo “inovação com impacto social” abrange produtos, processos e serviços inovadores voltados à solução de desafios sociais. Essa concepção, hoje amplamente difundida, ganhou relevância acadêmica a partir dos trabalhos de Taylor, destacados por Pacheco, Santos e Silva (2018).

Nesse contexto, inserem-se as iniciativas relacionadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Adotados em setembro de 2015 pelos 193 Estados-membros, os ODS compõem uma agenda abrangente que define metas e indicadores para enfrentar desafios globais como pobreza, fome, saúde, educação, igualdade de gênero, acesso à água e saneamento, energia limpa, trabalho decente, inovação, ação climática e justiça social.

Na Figura 1 são apresentados os dezessete objetivos para um desenvolvimento sustentável, definido pela Organização da Nações Unidas (ONU)

**Figura 1-** Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável – ODS – ONU.



**Fonte:** Fundação Oswaldo Cruz, (2024)

Os ODS têm ligação direta com o chamado “impacto social”, pois constituem uma estrutura global que orienta esforços para melhorar as condições de vida em escala mundial. Organizações, empresas e projetos que atuam em consonância com os ODS contribuem significativamente para o alcance dessas metas, gerando impacto social positivo.

A inovação social compartilha diversos atributos com a inovação tradicional, já que ambas buscam atender objetivos e necessidades por meio de novas abordagens. No entanto, sua principal diferença está na intencionalidade: enquanto a inovação tradicional visa prioritariamente ao valor econômico, a inovação social busca criar e desenvolver valor social (CAMPIGOTTO et al., 2020).

Diferentemente da inovação tecnológica, cujo foco é a criação de novos processos produtivos e mercados, a inovação social preocupa-se com a melhoria do bem-estar de indivíduos e comunidades por meio do emprego, consumo e participação social. Seu propósito central é fornecer soluções para problemas coletivos, promovendo mudança social e melhoria da qualidade de vida.

Trata-se, portanto, de uma solução inovadora para problemas sociais que se mostra mais efetiva, eficiente, sustentável ou justa que as alternativas existentes, e cujo valor gerado beneficia sobretudo a sociedade como um todo. Por isso, é considerada um conceito adequado para compreender e promover mudanças sociais duradouras.

As inovações sociais vêm conquistando espaço justamente por essa capacidade, mas também porque as ferramentas tradicionais de políticas públicas e as soluções de mercado têm se mostrado insuficientes para superar desigualdades, enfrentar questões de sustentabilidade e responder aos desafios das mudanças climáticas (REINALDO; PINTO, 2023). Nesse sentido, a inovação social surge como um meio alternativo e acessível de transformação, reunindo esforços coletivos em prol de melhorias sociais (HWANG et al.; NURCHOLIDAH et al., 2023).

Em uma perspectiva ampla, podem-se incluir tantas inovações desenvolvidas por grandes empresas — ainda que protegidas por direitos de propriedade industrial e orientadas ao lucro — quanto soluções de baixo custo, desde que tenham impacto positivo sobre demandas sociais. Cassiolato, Soares e Lastres (2008) exemplificam esse espectro ao citar desde tecnologias de ponta voltadas à saúde pública até a difusão de cisternas no semiárido brasileiro.

A inovação social fundamenta-se, portanto, na teoria social, uma vez que trata da interação entre diversos agentes. Situa-se nas interfaces entre governo, empresas e sociedade civil, cujas lógicas de ação e mecanismos de regulação são distinguidas e, muitas vezes, limitadas para resolver problemas complexos (HOWALDT; DOMANSKI; KALETKA, 2016).

As chamadas “inovações com impacto social” incluem ainda tecnologias em que grupos sociais não apenas se beneficiam, mas também colaboram ativamente em seu desenvolvimento. Nesse sentido, a inovação social destina-se a criar mudanças positivas duradouras, enfrentando problemas como pobreza, desigualdade, falta de acesso à educação e à saúde, entre outros desafios sociais.

No quadro 1, são apresentados alguns conceitos e definições de Inovação Social, segundo alguns autores.

**Quadro 1- Definições de Inovação Social segundo a Literatura**

| <b>Autor</b>                           | <b>Conceito</b>  |
|--|--|
| Pilarczyk et. al (2019)                | A inovação social visa atender às necessidades da sociedade e, portanto, faz parte do desenvolvimento socioeconômico.  |
| Repo et. al. (2019)                    | A inovação social é vista como uma opção para enfrentar os desafios da sustentabilidade, com foco na mobilização e impacto social, e é distinta de outros tipos de inovação em termos de distribuição de fatores de sucesso  |
| Farchi et. al. (2019)                  | IS são novas soluções (produtos, serviços, modelos, mercados, processos, etc.) que satisfazem simultaneamente uma necessidade social (de forma mais eficaz do que as soluções existentes) e conduzem a capacidades e relações novas ou melhoradas e a uma melhor utilização dos ativos e recursos                              |
| Murray, Caulier-Grice, & Mulgan (2019) | Exploram a inovação social, destacando sua importância para enfrentar desafios globais como as mudanças climáticas e as desigualdades sociais, e a necessidade de abordagens colaborativas e interdisciplinares.   |
| Erdem Trk (2020)                       | Inovação social consiste em encontrar uma solução eficiente, eficaz e permanente para um problema social ou aproveitar as soluções existentes para criar valores, tendo em conta os interesses da sociedade em geral   |
| Antonovz et. al(2020)                  | Gerar desenvolvimento local por meio da constituição de um condomínio de agro energia no Brasil, o que teve implicações positivas para as famílias, o meio ambiente e o desenvolvimento tecnológico  |
| D'Amario & Comini (2020)               | Inovação social pode assumir várias formas no contexto brasileiro, desde iniciativas educacionais até soluções sustentáveis de energia e gestão de resíduos, todas voltadas para a melhoria da qualidade de vida de indivíduos e comunidades   |
| Phills, Deiglmeier, & Miller (2020)    | Em uma série de publicações, esses autores definem inovação social como qualquer nova solução para um problema social que seja mais eficaz, eficiente, sustentável, ou justa do que as soluções existentes, e para as quais o valor criado se destine primariamente à sociedade como um todo.                                  |
| Colell (2021)                          | A inovação social considera não apenas recursos de poder material, como dinheiro, tecnologias e instalações, mas também recursos de poder imaterial, como processos de tomada de decisão, estruturas de propriedade ou narrativas, como igualmente importantes para o design e a mudança do sistema                            |
| Ribas & Make (2021)                    | A inovação social refere-se a novos conceitos, estratégias, iniciativas, produtos, serviços ou processos que atendem a necessidades sociais e alteram as rotinas básicas, o fluxo de recursos e a autoridade, e o impacto nas crenças do sistema social, para promover uma mudança, tanto em nível individual quanto sistêmico |
| Foroudi (2021)                         | A inovação social pode ser definida como uma solução nova e mais eficaz para um problema social que impacta positivamente a sociedade  |
| Hill et. al.(2022)                     | Solução mais eficaz para um problema social que impacta positivamente a sociedade  |
| PolytechnicNational University (2022)  | As inovações sociais são a fonte motivacional do desenvolvimento social, uma vez que estão diretamente relacionadas à melhoria da qualidade de vida humana, motivação para o autodesenvolvimento e criatividade  |
| Feitosa et. al (2022)                  | Inovação Social está preocupada com a redução da pobreza ou atendimento das necessidades sociais, melhoria das condições de vida e busca do bem estar da coletividade, que segundo análise apresenta as seguintes barreiras. Figura 2.   |
| Calvo et. al (2023)                    | A inovação social é o processo pelo qual novas maneiras de fazer as coisas são criadas para responder às necessidades da sociedade.  |
| P.B.R. et. al (2023)                   | A inovação social é o processo de desenvolvimento e implementação de novas soluções para resolver problemas sociais e ambientais.  |
| Widiono et. al (2024)                  | A inovação social é qualquer inovação que respem que a um problema social, dentro do quadro de normas, valores e anomalias locais, com o objetivo de permitir maior eficiência e satisfação com o governo e a sociedade  |

**Fonte:** Autor, (2025)

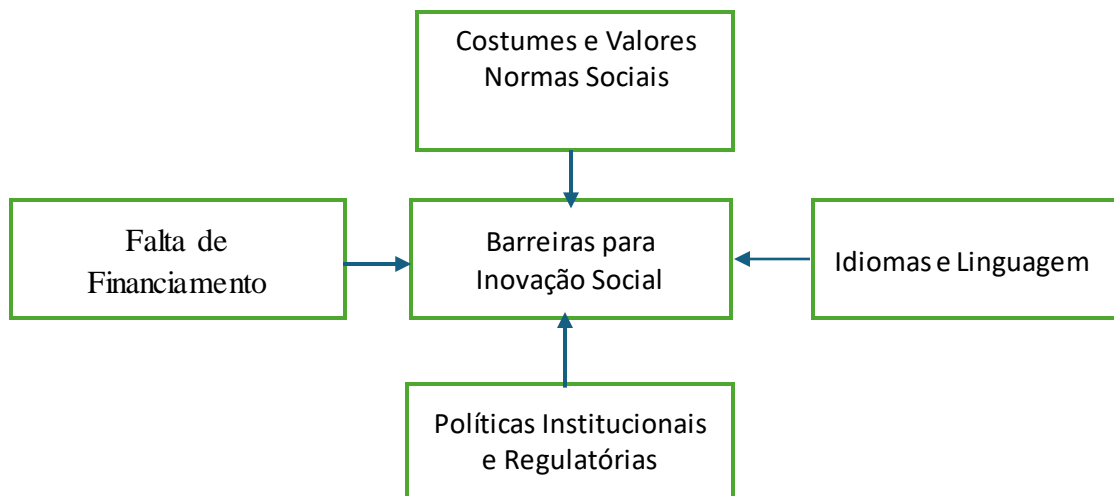
Feitosa, Sano e Ramos (2022) citam o estudo de Bataglin (2017), no qual são identificadas as principais barreiras à inovação social. Entre elas destacam-se a ausência de políticas públicas e de marcos regulatórios, a falta de apoio governamental, a insuficiência de qualificação dos atores sociais locais e a carência de capacitação técnica. Além disso, observa-se resistência das comunidades em modificar padrões convencionais, limitações de apoio financeiro, rigidez dos processos do sistema bancário tradicional, resistência político-institucional e dificuldades de articulação com o poder público.

Por outro lado, a autora aponta também fatores que podem atuar como facilitadores da inovação social. Entre eles estão a formação de redes de colaboração entre diferentes atores, as parcerias intersetoriais, a identidade coletiva e os laços de confiança estabelecidos. Soma-se a isso o compartilhamento de valores comuns, como cooperação e solidariedade, a adoção de gestão participativa, estruturas organizacionais flexíveis e horizontalizadas, além do baixo nível de formalização e a valorização do processo em si.

Outros elementos relevantes incluem a autonomia para exposição de ideias e iniciativas, o engajamento comunitário, a valorização da liderança local, o incentivo à produção e ao consumo solidário, bem como a transmissão do conhecimento aos menos experientes, fortalecendo processos de aprendizagem compartilhada.

Na Figura 2, apresenta-se uma síntese das barreiras para a Inovação Social.

**Figura 2:** Barreiras para Inovação Social



Fonte: Feitosa et. al. (2022)

**Quadro 2-** Tipos e classificação de Inovação Social, centrada no usuário, meio e nas empresas

| Classificação        | Tipo de Inovação Social   |   |   |
|----------------------|---|---|---|
|                      | Centrada no Indivíduo   | Orientada pelo Meio   | Realizada nas Empresas  |
| Forma                | Imaterial, se opondo à noção de produto   | Imaterial (novas relações sociais)  | Novas formas de organização do trabalho   |
| Processo             | Interação e cooperação entre os envolvidos, desde a tomada de consciência da necessidade e a concepção do projeto, até a execução               | Criação de novas instituições ou modificação do papel das existentes  | Desenvolvimento de novas estruturas de produção   |
| Atores envolvidos    | Indivíduos  | Sociedade; Poder público  | Direção e colaboradores   |
| Objetivos da Mudança | Solução de problemas sociais  | Melhoria da qualidade de vida   | Perspectiva instrumental: necessidade de um rearranjo que facilite a criação do conhecimento e a inovação tecnológica;<br>Perspectiva não-instrumental: melhoria da qualidade de vida no trabalho |
| Exemplo de Ações     | Empréstimos iniciais realizados pelo <i>Grammen Bank</i> , quando o objetivo inicial era a retirada das mulheres artesãs da situação de pobreza | Consolidação do <i>Grammen Bank</i> , promovendo desenvolvimento econômico e social nas regiões onde atuava | Estrutura composta por mulheres; forma de prospecção de clientes  |

Fonte: Reinaldo, Pinto (2023)

A inovação social é compreendida como uma abordagem inclusiva e colaborativa para enfrentar problemas sociais, integrando sustentabilidade, equidade e participação democrática

como elementos centrais. Ao longo do tempo, seu foco evoluiu de mudanças comportamentais e institucionais para uma perspectiva mais sistêmica, que envolve múltiplos setores da sociedade.

As definições mais recentes incorporam a necessidade de sustentabilidade, justiça social e participação democrática, consolidando a inovação social como uma ferramenta fundamental para responder a desafios em um mundo cada vez mais interconectado.

Nesse contexto, a concepção de desenvolvimento sustentável é entendida como a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras: “desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (FIALHO et al., 2008, p. 40).

A inovação social e a inovação frugal apresentam forte interligação na busca por soluções acessíveis, inclusivas e sustentáveis, sobretudo em comunidades de baixa renda e regiões emergentes. Por essa perspectiva, as inovações sociais configuram-se como novas ideias, produtos ou serviços que não apenas beneficiam indivíduos, mas também contribuem para enfrentar desafios globais como desigualdade social, mudanças climáticas, acesso à saúde e à educação.

O objetivo principal, nesse sentido, é a promoção do bem-estar e do progresso coletivo, por meio da criação de soluções que impactem positivamente as comunidades. Essa concepção contrapõe-se à visão de inovação preconizada por Schumpeter (1934), centrada na economia e na “destruição criativa”, destacando, em vez disso, o caráter sociológico e inclusivo da inovação social.

Assim, a inovação é entendida como um processo social que resulta da interação entre indivíduos de diferentes grupos, promovendo a introdução de ideias, práticas, produtos e serviços voltados a necessidades sociais específicas. Tais processos podem ser materializados em ações ou práticas de inovação social, Figura 3.

**Figura 3 - Exemplos de Práticas para Inovação Social**



**Fonte:** Adaptado Jain, (2023)

### 2.2.1 Características de Inovação Social

- **Impacto social:** A inovação social tem como objetivo gerar impacto social positivo e abordar desafios sociais urgentes. Seu foco é melhorar o bem-estar e a qualidade de vida de indivíduos e comunidades, especialmente daqueles que são marginalizados ou carentes.
- **Colaboração e co criação:** A inovação social geralmente envolve colaboração e co criação entre diversas partes interessadas, incluindo indivíduos, organizações, comunidades, governos e universidades.
- A co criação envolve o envolvimento ativo de beneficiários, usuários finais e outras partes interessadas no processo de inovação, garantindo que suas vozes sejam ouvidas e suas necessidades atendidas, reconhecendo o valor da sabedoria coletiva, da experiência e dos recursos para encontrar soluções inovadoras.

- No entanto, aqui se reafirma a visão de uma co criação de base sociológica, visando compreender esta prática como, processo relacional, dialógico e comunitário, que vai além da lógica mercadológica, exposta por autores como, Prahalad, Ramaswamy (2004), e vai de encontro a abordagens sociológicas, de Inovação e co criação social, propostas por, Jouvenet (2019), e Borzaga (2014).
- **Pensamento sistêmico:** A inovação social adota uma abordagem sistêmica para a solução de problemas, considerando a interconexão de fatores sociais, econômicos e ambientais. Seu objetivo é identificar e abordar as causas básicas dos problemas sociais, em vez de apenas tratar seus sintomas relevantes, inclusivos e significativos para os beneficiários pretendidos.
- **Estratégias inovadoras:** A inovação social incentiva o pensamento não convencional e a exploração de novas maneiras de abordar os problemas. Isso pode envolver o reaproveitamento de recursos existentes, a alavancagem da inovação tecnológica, o redesenho de processos ou a adaptação de soluções bem-sucedidas de um contexto para outro.
- **Empatia e centralização no usuário:** A inovação social enfatiza muito a compreensão das necessidades, aspirações e perspectivas das pessoas afetadas pelos problemas sociais. Envolve um profundo senso de empatia e incorpora princípios de design centrados no usuário para desenvolver soluções que sejam criativas.
- **Criatividade e inovação:** A inovação social incentiva o pensamento criativo e inovador para desafiar a sabedoria convencional e desenvolver novas abordagens para as questões sociais. Ele explora a ideação, os métodos, as tecnologias, os modelos de negócios ou as estruturas de políticas que têm o potencial de interromper os sistemas existentes e criar mudanças positivas.
- **Escalabilidade e replicabilidade:** A inovação social busca soluções que possam ser ampliadas ou replicadas para atingir uma população mais ampla ou abordar

desafios semelhantes em diferentes contextos. Seu objetivo é criar modelos sustentáveis que possam ser adotados e adaptados por outros para maximizar o impacto.

- **Resultados mensuráveis:** As inovações sociais eficazes têm resultados mensuráveis e métricas de impacto. Essas métricas ajudam a avaliar o sucesso da inovação em atingir seus objetivos pretendidos.
- **Capacitação e inclusão:** A inovação social visa capacitar as populações marginalizadas e vulneráveis, garantindo sua participação ativa no processo de inovação e nos benefícios de seus resultados.

Prabhu (2021) afirma que a Inovação Frugal pode é um poderoso caminho para a Inovação Social ao possibilitar o desenvolvimento de produtos e serviços acessíveis e adaptados ao contexto local, promovendo inclusão social e desenvolvimento sustentável

Em síntese, a inovação social representa uma estratégia capaz de integrar sustentabilidade, participação democrática e equidade, orientando-se para a resolução de problemas coletivos e para a promoção do bem-estar social. Diferencia-se da inovação tradicional e tecnológica por ter a criação de valor social como principal finalidade, o que a torna particularmente relevante em contextos de desigualdade e de vulnerabilidade socioeconômica.

Essa abordagem, ao valorizar a cooperação, a solidariedade e a inclusão, revela-se um instrumento indispensável para responder aos desafios contemporâneos. Sua articulação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável reforça seu papel como motor de transformação em escala global, contribuindo para mudanças duradouras nas comunidades.

Dessa forma, a inovação social estabelece uma ponte direta com a inovação frugal, visto que ambas buscam soluções simples, acessíveis e sustentáveis, especialmente para populações em situação de restrição de recursos. Essa intersecção será explorada no próximo capítulo, que analisa a inovação frugal como modelo alternativo de desenvolvimento tecnológico e social.

## 2.3 Inovação Frugal

A inovação frugal pode ser definida como um processo de criação de soluções simples, acessíveis e eficientes, direcionadas às necessidades de populações com recursos limitados. Segundo Bhatti (2012), esse modelo busca reduzir custos sem comprometer a funcionalidade essencial, valorizando a criatividade em contextos de escassez. Diferencia-se, assim, dos modelos tradicionais, que priorizam a sofisticação tecnológica e o retorno financeiro imediato.

Quando aplicada a novos artefatos, a inovação frugal transforma objetos comuns em soluções de impacto social. Radjou e Prabhu (2015) ressaltam que tais inovações incorporam a lógica do “fazer mais com menos”, tornando-se acessíveis, sustentáveis e socialmente relevantes. Nesse sentido, a telha de PEAD reciclado com grafeno representa um exemplo concreto, ao reunir eficiência tecnológica, baixo custo e sustentabilidade ambiental, atendendo a demandas locais específicas.

A adoção da inovação frugal como estratégia de desenvolvimento possui implicações que ultrapassam a esfera econômica. Ao privilegiar soluções inclusivas, contribui para a redução das desigualdades sociais e para o fortalecimento das capacidades comunitárias (BOUND; THORNTON, 2012). Em vez de se limitar ao estímulo do crescimento econômico, promove um desenvolvimento mais equitativo, orientado a benefícios sociais e à valorização das pessoas.

Dessa forma, ao se articular com a tecnociência solidária, a inovação frugal reforça a perspectiva de que o progresso não deve ser medido unicamente pelo aumento do PIB, mas pela melhoria da qualidade de vida coletiva.

Dagnino (2008) destaca que o conhecimento científico e tecnológico pode ser orientado para reduzir vulnerabilidades sociais. Nesse contexto, a inovação frugal contribui para reorientar o desenvolvimento em direção à justiça social e à inclusão produtiva.

As telhas de PEAD reciclado com grafeno exemplificam essa perspectiva, pois utilizam resíduos plásticos como matéria-prima, fortalecendo práticas de reciclagem alinhadas à tecnociência solidária (DAGNINO, 2008). Além de reduzir impactos ambientais, esse artefato pode ser produzido em parceria com cooperativas de catadores, promovendo formas coletivas de trabalho, geração de renda e inclusão social.

Dessa forma, o produto não apenas materializa a lógica da inovação frugal, mas também reforça a valorização das pessoas e comunidades envolvidas no processo produtivo. A inovação frugal tem sido associada à *Jugaad Innovation*, termo de origem hindu que significa “improvisação”. Essa abordagem, segundo Radjou, Prabhu e Ahuja (2012) e Radjou e Prabhu (2014), remete a soluções criativas e adaptativas que surgem rapidamente, mesmo antes de se garantir uma solução definitiva.

Por outro lado, alguns pesquisadores criticam essa comparação, argumentando que a inovação deve estar vinculada a processos estruturados nas empresas (inovação tradicional). Assim, a *Jugaad Innovation* estaria mais próxima de soluções improvisadas, baseadas em poucos processos industriais e na criatividade popular (KOERICH; CANCELLIER, 2019 apud RIBEIRO et al., 2022).

As iniciativas de inovação frugal são frequentemente associadas a países com economias emergentes, onde grande parte da população está na base da pirâmide, com demandas sociais não atendidas (KOERICH; CANCELLIER, 2019). Contudo, a inovação frugal ultrapassa esse contexto, pois também auxilia fabricantes a atender novos mercados, projetando produtos que possam alcançar diferentes públicos sem comprometer qualidade ou funcionalidade (MOURTZIS, 2018).

Reconhecida por sua capacidade de gerar soluções que atendem às necessidades de populações em situação de restrição de recursos, a inovação frugal tem despertado crescente interesse acadêmico e consolidado seu papel como modelo alternativo de inovação (HOSSAIN, 2020).

No entanto, a Inovação frugal vai além das economias emergentes, uma vez que auxilia os fabricantes a atenderem novos mercados, projetando produtos que possam atender diferentes públicos sem que se comprometa a qualidade ou a funcionalidade (MOURTZIS, 2018).

A Inovação Frugal é conhecida pela sua capacidade de gerar soluções e produtos que atendam às necessidades da população que se encaixa nesta base, sob o contexto de minimização de recursos, e tem sido foco de interesse significativo de pesquisadores (HOSSAIN, 2020).

**Figura 4:** Exemplo de Inovação Frugal, Improvisação e aderência com a real situação.



**Fonte:** Wordpress, (2014)

Na Figura 5, apresenta o veículo Tata Nano®, lançado em 2008 pela Tata Motors. Considerado o automóvel mais barato do mundo, custava cerca de US\$ 2.000, valor de duas a três vezes inferior ao de outros veículos produzidos na Índia.

O modelo foi projetado para famílias que dificilmente teriam acesso ao mercado automotivo tradicional, funcionando como alternativa à motocicleta. A proposta era oferecer os elementos essenciais de um automóvel, com menor custo e uso reduzido de recursos, mas garantindo às famílias de baixa renda a possibilidade de adquirir um veículo. Esse exemplo enquadra-se de forma clara na definição de inovação frugal.

Radjou e Prabhu (2015) reforçam essa concepção ao afirmarem que a inovação frugal está na “capacidade de criar soluções mais simples e acessíveis, utilizando menos recursos, mais que continuam sendo eficazes e de valor para os consumidores”.

**Figura 5** – Veículo Tata Nano®, caracterizado como inovação frugal em seu potencial



**Fonte:** Motorsport, (2018)

Na Figura 6, apresenta-se o equipamento Muchilink®, capaz de transmitir televisão utilizando redes de telefonia 3G, 4G ou 5G. Essa tecnologia substitui a Unidade Móvel de Jornalismo (Figura 7), configurando-se como solução portátil e otimizada para transmissões ao vivo. O equipamento oferece menor custo, maior mobilidade e menor complexidade, favorecendo, inclusive, produções independentes.

De acordo com Radjou, Prabhu e Ahuja (2012), a inovação frugal busca justamente reduzir custos e complexidade, criando soluções acessíveis e escaláveis, capazes de atender diferentes públicos e contextos.

**Figura 6-**Mochilink



**Fonte:** UOL(2019)

**Figura 7-** Unidade Móvel de Jornalismo



**Fonte:** RF COM Sistemas, (2021)

**Figura 8 -** Definição de Inovação Frugal em Diferentes Níveis



**Fonte:** Autor, (2025)

**Figura 9 - Definições Institucionais de Inovação Frugal**



**Fonte:** Adaptado Bhatti et.al, apud Silva (2022)

Patnaik e Bhowmick (2020) e Hossain e Sarkar (2021) destacam que a inovação frugal exerce papel significativo na inovação inclusiva, pois tem se tornado cada vez mais relevante para o empoderamento social e político das populações situadas na base da pirâmide socioeconômica.

Também denominada “*inovação jugaad*” ou “*inovação de Gandhi*”, a inovação frugal busca reduzir a complexidade tecnológica e, ao mesmo tempo, fornecer valor aos consumidores em

ambientes marcados pela escassez de recursos (ANANTHRAM; CHAN, 2021; DABIC et al., 2022).

**Quadro 3** - Conceitos, autores, contribuições e características de Inovação Frugal

| Conceito                     | Autor (a)                               | Contribuição conceitual  | Características                                    |
|------------------------------|---|--|--|
| Ecosistema frugal            | Wooldridge (2010)                       | Primeira publicação sobre a temática inovação em mercados emergentes, com uma análise geral sobre produtos alterados a fim de reduzir custos.  | Redução de custo a partir da alteração de produtos |
| Ecosistema frugal            | Gupta (2011)                            | Propõe um novo modelo de gerenciamento que contempla as necessidades específicas dos mercados da base da pirâmide.   | Proposição de novo conceito.                       |
| Ecosistema frugal            | Bhatti (2012)                           | Redução de custos e acessibilidade do comprador. A IF também visa o empreendedorismo local, capacitação e autossuficiência.  | Aumento de acessibilidade; Sustentabilidade.       |
| Funcionalidades e desempenho | Tiwari & Herstatt (2012)                | Minimiza o uso de recursos no processo de concepção, produção e comercialização, reduzindo funcionalidades, mantendo o essencial, mantendo critérios de avaliação.                       | Acessibilidade; Robustez; Escalabilidade.          |
| Redução de custo             | Bound & Thorthon (2012)                 | Foco em mercados com limitações financeiras, transformando restrições em vantagens.  | Foco na área de serviços.                          |
| Ecosistema frugal            | Rao (2013)                              | Necessidade de uma discussão global, justificando melhoria na economia e sustentabilidade.   | Sustentabilidade; Facilidade de uso.               |
| Ecosistema frugal            | Bhatti e Ventresca (2013)               | Ampliação da população alcançada e beneficiada por IF.   | Acessibilidade; Escalabilidade.                    |
| Funcionalidades e desempenho | Basu, Banerje & Sweeny (2013)           | Tipo de inovação baseado nas necessidades e no contexto financeiro de países em desenvolvimento, por meio da simplificação.  | Robusteza; Inovação centrada no ser humano.        |
| Funcionalidades e desempenho | Pawlowski (2013)                        | Produtos e serviços adaptáveis, escaláveis, reduzindo consideravelmente funcionalidades não essenciais a fim de reduzir custos.  | Acessibilidade; Escalabilidade.                    |
| Funcionalidades e desempenho | Zeschky, Winterhalter & Gassmann (2014) | Produtos ou serviços desenvolvidos a partir de ambientes com recursos limitados, com redução de funcionalidade mantendo o essencial.   | Robusteza; Limitações financeiras.                 |
| Redução de custo             | Prabhu & Gupta (2014)                   | Foco em países em desenvolvimento para alcançar consumidores sensíveis aos preços, que buscam em paralelo produtos confiáveis.   | Acessibilidade; Sensibilidade ao preço.            |
| Redução de custo             | Radjou & Prabhu (2014)                  | Capacidade de fazer mais ou melhor com menos recursos; minimizar o uso de recursos naturais. Produtos criados para o mercado emergente mas que são exportados para países desenvolvidos. | Acessibilidade; Sustentabilidade; Novos negócios.  |
| Funcionalidades e desempenho | Tiwari & Herstatt (2014)                | Novos produtos e serviços melhorados cumprindo critérios e padrões de qualidade; Evitar uso de recursos naturais e limitados.  | Robusteza; Sustentabilidade.                       |
| Funcionalidades e desempenho | Soni & Krishnan (2014)                  | Cumprir alvos pré-definidos de nível bom e suficiente no quesito de funcionalidades.   | Converter a mentalidade das empresas.              |
| Redução de custo             | Simula, Hossain & Halme (2015)          | IF atender as necessidades dos consumidores da base da pirâmide, normalmente encontrados em países emergentes e de baixa renda.  | Sensibilidade ao preço.                            |
| Ecosistema frugal            | Weyrauch & Herstatt (2016)              | Redução de custo associado as limitações financeiras; Foco na facilidade de uso e nas funcionalidades essenciais.  | Redução substancial de custos; Sustentabilidade    |
| Ecosistema frugal            | Mazieri (2017)                          | Novos modelos de marketing, modelos organizacionais, que resultam na inclusão social.  | Novo modelo de negócio, Acessibilidade             |
| Ecosistema frugal            | Amorim <i>et al.</i> (2018)             | Associação da sustentabilidade com a frugalidade. Conduta sustentável para organizações e consumidores.  | Sustentabilidade                                   |

Fonte: Viana et. al (2021)

Os diversos estudos têm analisado aspectos da inovação frugal (WEYRAUCH; HERSTATT, 2017; PISONI; MICHELINI; MARTIGNONI, 2018; DANGELO; MAGNUSSON, 2021). Entretanto, observa-se que ainda são relativamente poucos os trabalhos voltados a investigar suas vantagens em termos de sustentabilidade.

Apesar de recente, essa abordagem revela características próximas às da sustentabilidade, pois ambas buscam restringir o uso de recursos, promovendo impactos econômicos, ambientais e sociais. Nesse sentido, a inovação frugal pode contribuir para a redução da pobreza e a inclusão social (ASAKAWA et al., 2019). Não por acaso, essa perspectiva tem ganhado relevância também em nações industrializadas, onde influencia a competitividade das indústrias locais no longo prazo (KOERICH; CANCELLIER, 2019).

A inovação frugal, em essência, propõe “fazer mais com menos”, desenvolvendo produtos, serviços e processos capazes de atender necessidades essenciais dos consumidores com o uso reduzido de recursos (RADJOU; PRABHU, 2015). Diferentemente da *jugaad innovation*, associada à improvisação, a inovação frugal requer uma adaptação ágil que busca estruturar soluções sustentáveis e replicáveis (CASSIOLATO; SOARES; LASTRES, 2018).

Radjou, Prabhu e Ahuja (2012) destacam três princípios fundamentais da inovação frugal: (1) a importância de encontrar oportunidades na escassez e produzir mais com menos; (2) a valorização de uma mente flexível, menos comprometida com padrões pré-estabelecidos; e (3) a ênfase na simplicidade, evitando luxo ou sofisticação desnecessária.

Prabhu (2017) reforça essa perspectiva ao apresentar a inovação frugal como um paradigma voltado à criação de soluções mais rápidas, melhores e baratas, desenvolvidas com mínimo de recursos. Dessa forma, torna-se possível atender de maneira sustentável a uma parcela maior da população, respondendo ao desafio global de suprir bilhões de consumidores sem ultrapassar os limites do planeta.

Nessa linha, Hossain (2016) e Zeschky, Widenmayer e Gassmann (2011) acrescentam que a inovação frugal pode ser definida como o desenvolvimento de soluções acessíveis e aceitáveis para contextos de recursos escassos, voltadas a consumidores que não podem arcar com produtos convencionais.

A inovação frugal promove a sustentabilidade de forma mais efetiva do que os produtos convencionais. Além disso, modelos de negócios sustentáveis apresentam vantagens competitivas ao capturar e criar propostas de valor capazes de maximizar soluções (HOSSAIN, 2021).

A inovação sustentável, por sua vez, está diretamente relacionada ao uso racional de recursos naturais, como água e energia, e à reutilização e reciclagem de matérias-primas. Negócios sociais sustentáveis fortalecem relações mais equilibradas entre os atores envolvidos, mantendo o foco na utilização eficiente dos insumos e na consideração de riscos durante a tomada de decisão (LOPES et al., 2020).

Nessa perspectiva, a frugalidade orienta-se para a criação de produtos e serviços básicos que atendam a um grande número de pessoas. Segue-se, assim, a lógica de “fazer mais com menos”, buscando oferecer maior valor e benefícios com recursos reduzidos (ZESCHKY; WINTERHALTER; GASSMANN, 2014; RADJOU; PRABHU, 2015).

Em síntese, a inovação frugal propõe soluções simples e eficientes para problemas complexos, mostrando-se especialmente relevante em cenários de escassez de recursos tecnológicos, financeiros e de infraestrutura. Seu objetivo é extrair o máximo a partir de recursos mínimos, adaptando tecnologias às condições disponíveis. Nesse sentido, Belém (2021) aponta que a inovação frugal busca enfrentar impasses de grandes proporções por meio de soluções facilitadoras, e em alguns casos, exclusivas.

Com o crescimento econômico limitado em países desenvolvidos, verifica-se a tendência crescente de buscar soluções que entreguem mais valor com menos recursos (RADJOU; PRABHU; AHUJA, 2012). É nesse cenário que se inserem as telhas de PEAD reciclado com grafeno, cujo custo de produção é inferior ao de materiais convencionais, sem perda significativa de desempenho. Assim, configuram-se como alternativa competitiva tanto em mercados emergentes quanto em economias avançadas.

O Quadro 4, apresenta as razões que justificam investimentos em inovação frugal e evidencia de que maneira as telhas de PEAD reciclado com grafeno se alinham a esses pilares globais, reforçando sua relevância no contexto do desenvolvimento sustentável.

**Quadro 4** – Razões para investir em inovação frugal e sua relação com as telhas de PEAD reciclado com grafeno

| <b>Razões para investir em Inovação Frugal</b>   | <b>Relação com as Telhas de PEAD Reciclado com Grafeno</b>  |
|--|---|
| Crescimento lento das economias desenvolvidas aumentará a procura de inovações frugais.  | Apresenta, baixo custo de produção e pode competir em mercados globais, oferecendo alternativa viável frente a materiais convencionais mais caros.  |
| As restrições ambientais aumentaram a procura por modelos frugais de produção e consumo.   | A telha promove economia circular ao utilizar resíduos plásticos (PEAD), evitando descarte inadequado e reduzindo a exploração de recursos naturais.  |
| As sociedades em envelhecimento têm exigido novas abordagens às exigências de saúde e de assistência social.                                   | O artefato, é leve e de fácil instalação, facilitando seu uso em habitações sociais e projetos que demandam soluções práticas, acessíveis e de impacto positivo.  |
| Compreender que os mercados em rápido crescimento estão nas economias em desenvolvimento, em que os serviços e a procura frugais são elevados. | É capaz, de atende à alta demanda por habitação acessível e sustentável em países emergentes, ao mesmo tempo em que entrega alta performance por meio da resistência e durabilidade conferida pelo grafeno. |

**Fonte:** Autor, (2025)

Segundo Dima et al. (2022), uma economia mais sustentável oferece aos consumidores a oportunidade de atender às suas necessidades sem comprometer o futuro das próximas gerações, o que se alinha aos princípios da inovação frugal. Ao investigar a inovação frugal e sua contribuição para a sustentabilidade empresarial, os autores identificaram uma conexão positiva entre ambos os conceitos. Observou-se que as pesquisas sobre inovação frugal vinculadas à sustentabilidade empresarial apresentam uma tendência crescente ao longo dos anos, com aumentos significativos a partir de 2000 e, novamente a partir de 2015.

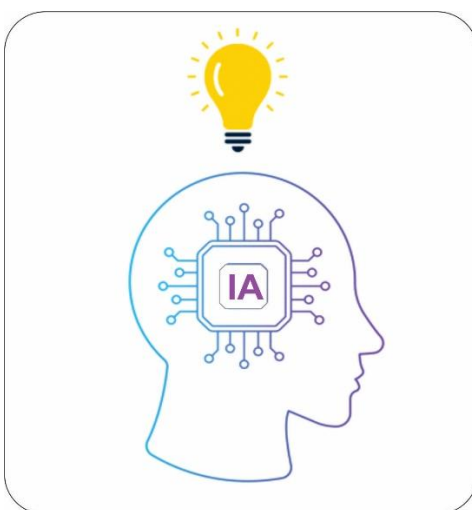
Entre 2016 e 2021, o interesse dos pesquisadores na relação entre inovação frugal e sustentabilidade empresarial foi elevado, e o número de citações triplicou em comparação ao período de 2011 a 2015. Esse crescimento pode ser explicado pelo aumento de produtos classificados como inovações frugais lançados no mercado na última década, com base em pesquisas e estudos prévios.

Além disso, o crescimento observado também se relaciona à crise econômica de 2007–2008, que estimulou países a desenvolver soluções frugais de maneira mais ágil. Indicadores como a produção científica anual e a análise de citações evidenciam um aumento significativo no interesse internacional e na produção científica, indicando que a inovação frugal associada à sustentabilidade empresarial tornou-se uma linha de investigação em expansão no início do século XXI.

O tema da inovação frugal tem sido estudado em diversos campos, especialmente na ciência e tecnologia, o que corresponde à definição central do conceito: desenvolver e implementar formas de reduzir a complexidade e o custo de produtos e processos de fabricação. Segundo Dabic et al. (2022), a inovação frugal gera ofertas satisfatórias mesmo sob restrições de recursos, atendendo diretamente às necessidades do usuário com base em três princípios fundamentais: simplicidade, acessibilidade e sustentabilidade ambiental.

No contexto atual, práticas de inovação frugal que geram benefícios coletivos com menor custo de utilização não podem prescindir do uso da Inteligência Artificial (IA). A adoção de inovação frugal sustentável tem se beneficiado significativamente do entendimento e aplicação da IA, como elemento estratégico, conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10** - Pensando em Inteligência Artificial (IA)



Fonte: Autor, (2025)

De acordo com Govindan (2022), “o entendimento da Inteligência Artificial constitui o fator mais influente na implementação da inovação frugal sustentável, uma vez que direciona decisões estratégicas e promove maior eficiência no uso dos recursos”. O autor destaca que compreender a Inteligência Artificial permite otimizar recursos, reduzir custos e ampliar o impacto socioambiental das soluções implementadas, favorecendo a adoção da inovação frugal sustentável.

Segundo Russell e Norvig (2021), a Inteligência Artificial estuda agentes capazes de perceber o ambiente e agir para maximizar suas chances de alcançar objetivos. Quando aplicada ao campo social, a IA torna-se uma tecnologia estratégica, capaz de promover inclusão, acessibilidade e bem-estar coletivo.

Nesse sentido, Govindan (2022) evidencia a Inteligência Artificial como aliado da inovação frugal sustentável, recomendando seu aprofundamento em pesquisas futuras. O autor identifica uma relação positiva entre IA e inovação frugal, propondo sua implementação efetiva para ampliar os benefícios sociais e ambientais dessa abordagem.

A Inteligência Artificial oferece recursos avançados para otimização de materiais, redução de custos operacionais e mitigação de impactos ambientais, elementos centrais da frugalidade. Para sua adoção, é essencial compreender os Fatores Críticos de Sucesso (FCS), que orientam a implementação eficaz da tecnologia e garantem resultados consistentes.

Govindan (2022) propõe uma estrutura de pesquisa para identificar e analisar os FCS, utilizando um estudo de caso dinamarquês como referência. Entre 24 fatores analisados em seis dimensões, o entendimento do conceito de IA destacou-se como o mais influente, conforme apresentado no Quadro 5, ao lado dos demais fatores relevantes identificados.

Adicionalmente, das cinco dimensões consideradas, a “inovação frugal tecnológica” apresentou o maior número de Fatores Críticos de Sucesso, evidenciando sua influência sobre as demais dimensões na adoção da Inteligência Artificial em processos de inovação frugal sustentável.

**Quadro 5 - Principais, Fatores Críticos para o Sucesso, na implantação de Inovação Frugal Sustentável.**

| <b>Fator Crítico de Sucesso (FCS)</b>              | <b>Descrição</b>  | <b>Base em Govindan (2022)</b>  |
|--|---|---|
| <b>Compreensão da Inteligência Artificial</b>      | Entender a IA como tecnologia estratégica é essencial para orientar decisões e estratégias frugais. | A compreensão da IA é apontada como o fator mais influente para viabilizar a inovação frugal sustentável. |
| <b>Otimização de recursos</b>                      | Redução de insumos, custos e desperdícios, com aumento da eficiência produtiva.                     | A IA permite analisar dados e processos em tempo real, reduzindo ineficiências.                           |
| <b>Tomada de decisão baseada em dados</b>          | Uso da análise avançada de informações para escolhas mais assertivas e sustentáveis.                | A IA contribui para decisões rápidas, embasadas e de menor risco.   |
| <b>Acessibilidade tecnológica e escalabilidade</b> | Produção de soluções acessíveis, de baixo custo e replicáveis em diferentes contextos.              | A inovação frugal se apoia em soluções que podem ser ampliadas sem grande demanda de recursos.            |
| <b>Sustentabilidade socioambiental</b>             | Alinhamento das soluções com objetivos ambientais e sociais de longo prazo.                         | A IA potencializa impactos positivos na redução de desigualdades e na preservação ambiental.              |
| <b>Inovação aberta e colaborativa</b>              | Envolvimento de empresas, universidades, governo e sociedade na geração de soluções conjuntas.      | A colaboração fortalece a difusão da inovação frugal.   |
| <b>Apoio institucional e regulatório</b>           | Incentivos governamentais e políticas públicas adequadas fortalecem a adoção da inovação frugal.    | Aspectos externos são determinantes para viabilizar a implementação em larga escala.                      |

Fonte: Adaptado de Govindan(2022)

Hossain (2021) demonstra como inovações frugais, combinadas a novos modelos de negócios, podem atender clientes carentes em países em desenvolvimento e desempenhar papel relevante no desenvolvimento sustentável. O autor analisou como empresas de base estruturam modelos de negócios sustentáveis, examinando três inovações frugais à luz dos três elementos-chave de um modelo de negócios: proposta de valor, criação de valor e captura de valor.

Dessa forma, Hossain (2021) amplia a literatura existente sobre modelos de negócios e complementa estudos anteriores sobre desenvolvimento inclusivo, sustentabilidade e inovação

frugal. As principais propostas de valor identificadas incluem produtos acessíveis e naturais, operação sem eletricidade, foco em nichos de mercado, empoderamento feminino e fácil acesso a produtos baratos e sustentáveis.

Os produtos acessíveis e sustentáveis permitem alcançar novos nichos de mercado, melhorando a qualidade de vida de clientes carentes e promovendo empregos locais. Além disso, as empresas oferecem treinamentos aos clientes, fortalecendo o impacto socioeconômico. Assim, a inovação frugal cria novos nichos, incluindo novos clientes, segmentos de mercado e meios para promover o desenvolvimento sustentável.

Para os países em desenvolvimento, é necessário adaptar os modelos de negócios para oferecer produtos acessíveis, sendo o conhecimento em nível de base essencial para atender às necessidades locais. A literatura sobre sustentabilidade social e inovação frugal evidencia a conexão entre os dois campos, demonstrando que a inovação frugal passou a se relacionar diretamente com a sustentabilidade social.

A sustentabilidade social constitui um dos pilares centrais do desenvolvimento sustentável. Este estudo evidencia que os objetivos de sustentabilidade social podem ser concretizados por meio da aplicação da inovação frugal, reforçando seu papel na promoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados à dimensão social.

A sustentabilidade social constitui um dos pilares centrais do desenvolvimento sustentável. Este estudo evidencia que os objetivos de sustentabilidade social podem ser concretizados por meio da aplicação da inovação frugal, reforçando seu papel na promoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados à dimensão social.

A literatura sobre sustentabilidade social e inovação frugal foi revisada e descobriu-se que os dois campos de estudo estão conectados. Os temas essenciais da sustentabilidade social foram estudados e sua relação com a inovação frugal foi explorada. Os resultados deste estudo são particularmente novos, pois a inovação frugal não estava ligada apenas à sustentabilidade social antes desta pesquisa.

Sociedades socialmente sustentáveis oferecem acesso e oportunidades iguais a todos os membros, tanto para a sobrevivência quanto para a realização de seu potencial de desenvolvimento.

Inovadores frugais direcionam soluções viáveis e acessíveis para clientes de baixa renda, adaptando produtos e serviços às suas necessidades específicas. Dessa forma, eles promovem

inclusão social e econômica, ao mesmo tempo em que criam oportunidades sustentáveis para esses segmentos tradicionalmente pouco atendidos.

Portanto, empresas que adotam inovação frugal contribuem simultaneamente para objetivos sociais e econômicos. Estudos indicam que a sustentabilidade social pode ser ampliada quando incorporadas práticas concretas voltadas para o cumprimento de metas socialmente responsáveis, reforçando a relevância da abordagem frugal em contextos de desenvolvimento sustentável.

A Índia concentra a maior quantidade de publicações científicas sobre inovação frugal, resultado do esforço de seus pesquisadores em desenvolver e disseminar o conceito. Países desenvolvidos, como Estados Unidos e Reino Unido, também possuem contribuições significativas, voltadas principalmente ao comportamento do consumidor e à inovação sustentável. No caso do Reino Unido, destaca-se a relevância do intercâmbio cultural e comercial com a Índia, que fortalece o relacionamento acadêmico e prático entre os países (FERNANDES et al., 2020 apud VIANA et al., 2021).

Dentro do contexto da inovação frugal e para reafirmar os objetivos do estudo, recorreremos às dimensões propostas por Herstatt e Tiwari (2020), que estabelecem quatro dimensões fundamentais para a inovação frugal. Estas dimensões permitem estruturar a análise e a implementação de soluções frugais de forma sistemática, alinhando prática e teoria.

**Acessibilidade Financeira:** A acessibilidade financeira é um elemento central na estratégia frugal, aplicável a produtos, serviços ou modelos de negócio. Entretanto, o produto frugal não precisa ser necessariamente mais barato do que alternativas não frugais comparáveis. O ideal é que ele apresente “tenacidade financeira”, considerando o custo total de uso ao longo de seu ciclo de vida, incluindo compra, uso, manutenção e descarte, conforme indicado por Herstatt & Tiwari (2020). Tiwari & Herstatt (2012) ampliam essa perspectiva, enfatizando que a inovação frugal visa minimizar o uso de recursos ao longo de toda a cadeia de valor, seja no desenvolvimento, produção, consumo ou disposição do produto

**Justificabilidade Social:** Não basta tornar soluções mais acessíveis; é necessário que elas gerem impacto positivo. O foco deve ser disponibilizar produtos que promovam o bem-estar público e não prejudiquem a sociedade (HERSTATT & TIWARI, 2020). Considerando as necessidades de todas as classes sociais, a inovação frugal pode ser entendida como uma estratégia

capaz de tornar soluções acessíveis e adequadas aos consumidores com recursos limitados (SANTOS et al., 2020; AGARWAL et al., 2017). Nesse sentido, a inovação frugal integra a categoria de inovações baseadas em restrições (BHATTI et al., 2013).

**Infraestrutura:** Deve-se evitar pré-requisitos de infraestrutura que elevem o custo de uso da solução. Produtos que exigem grandes investimentos ou condições difíceis de atender não são frugais. Por exemplo, um item que dependa de energia elétrica não será considerado frugal se for oferecido a comunidades sem acesso a eletricidade (HERSTATT & TIWARI, 2020). Assim, é fundamental expandir a aplicação de diretrizes frugais em diversos aspectos da fabricação, apoiando-se em ferramentas adequadas que conectem mercado e fabricante (MOURTZIS, 2018).

**Sustentabilidade Ambiental:** A redução de desperdício e de custos é uma característica central da inovação frugal. No entanto, essa premissa não deve promover consumismo nem gerar impactos negativos adicionais. A sustentabilidade ambiental é essencial para garantir a justificabilidade social das soluções (HERSTATT & TIWARI, 2020). Essa dimensão se alinha ao conceito de ecossistema da inovação frugal, conforme Rossetto et al. (2017), e reforça a relação entre inovação frugal e sustentabilidade, amplamente discutida na literatura (ALBERT, 2019; ROSCA et al., 2017, 2018).

Diante dessas perspectivas, a aplicação da inovação frugal em artefatos materiais ou imateriais, como telhas de PEAD reciclado geradoras de energia, representa um exemplo concreto de utilidade inclusiva. Esse tipo de solução ilustra o princípio de “fazer mais com menos”, possibilitando que uma parcela maior da população se beneficie de economia de energia por meio da geração própria.

## 2.4 Controvérsias sociotécnicas das telhas

As telhas de PEAD reciclado com grafeno, embora representem uma solução inovadora e socialmente orientada, não estão isentas de controvérsias. O uso do grafeno envolve implicações relacionadas à mineração e aos impactos ambientais de sua cadeia produtiva, enquanto o PEAD reciclado depende de fluxos eficientes de coleta seletiva e da atuação de cooperativas de catadores. Assim, o artefato não pode ser analisado isoladamente, devendo ser compreendido em meio às tensões e disputas que cercam sua produção.

Latour (2005) propõe que as tecnologias sejam entendidas como resultados de redes sociotécnicas compostas por atores humanos e não humanos. No caso das telhas, essa rede inclui pesquisadores, indústrias, gestores públicos, consumidores, catadores organizados em cooperativas, e os próprios materiais — PEAD e grafeno — cujas propriedades técnicas influenciam decisões de design e produção. Cada ator carrega interesses distintos, capazes de gerar benefícios sociais, mas também contradições vinculadas a pressões econômicas e ambientais.

Segundo Latour (2000), as controvérsias não devem ser vistas como falhas a eliminar, mas como momentos constitutivos da construção tecnológica. No contexto das telhas de PEAD reciclado com grafeno, a controvérsia se manifesta na tensão entre a busca por inclusão social e sustentabilidade e os interesses econômicos presentes na cadeia produtiva do grafeno. Reconhecer essas disputas permite compreender a inovação frugal não apenas como solução técnica, mas como prática inserida em uma ampla rede de atores e valores.

Dessa forma, as telhas assumem um caráter político, ao mobilizar debates sobre sustentabilidade, justiça social e formas coletivas de produção, especialmente quando associadas ao trabalho das cooperativas de catadores. Essa perspectiva aproxima o artefato da tecnociência solidária, preconizada por Dagnino (2008), que propõe direcionar ciência e tecnologia para fins sociais, incorporando e reconhecendo as controvérsias inerentes à realidade da inovação.

## **2.5 Tecnologia**

A visão tradicional de tecnologia, tratada como neutra e inevitável, é criticada por Andrew Feenberg em sua teoria crítica. Para ele, “a tecnologia não é simplesmente um meio, mas um meio de poder, incorporando valores sociais em forma material” (FEENBERG, 2002, p. 15).

Assim, os artefatos tecnológicos não podem ser reduzidos a instrumentos técnicos: eles expressam interesses sociais, políticos e econômicos. Nesse sentido, a tecnologia tanto pode reproduzir desigualdades como se tornar veículo de emancipação, dependendo da forma como é apropriada (FEENBERG, 1999; 2010).

Renato Dagnino, ao propor a Tecnociência Solidária, oferece um caminho de reorientação frente a essas críticas. Ele defende que a ciência e a tecnologia sejam mobilizadas como instrumentos de inclusão produtiva e social. Para o autor, “a tecnociência solidária deve ser

entendida como um esforço deliberado de reorientar o aparato científico-tecnológico em direção à inclusão social e à redução das desigualdades” (DAGNINO, 2008, p. 27).

Essa perspectiva desloca a inovação do campo exclusivamente mercadológico para o atendimento de demandas sociais.

A telha de PEAD reciclado com grafeno se insere nesse debate como exemplo de Inovação frugal. Ao reutilizar resíduos plásticos, incorporar o grafeno para maior resistência e possibilitar sua produção em arranjos cooperativos, ela traduz valores de sustentabilidade e inclusão.

Diferentemente de uma tecnologia voltada apenas ao lucro, responde ao chamado de “fazer mais com menos”, enunciado por, Radjou, Prabhu; Ahuja, (2015), tornando-se um artefato que contesta a neutralidade e o determinismo criticados por Feenberg. Assim, a telha reafirma a tecnociência solidária de Dagnino, unindo eficiência, baixo custo e transformação social.

## **2.6 Tecnologias Sociais**

As Tecnologias Sociais surgem em contraposição às Tecnologias Convencionais (TC), constituindo-se como tais apenas quando emergem de um processo de inovação. Nesse processo, é criado um conhecimento destinado a resolver os problemas enfrentados pelas organizações ou pelos grupos de atores envolvidos (DAGNINO, 2004).

Também são compreendidas como “um conjunto de técnicas e metodologias transformadoras, desenvolvidas e/ou aplicadas na interação com a população e por ela apropriadas, que representam soluções para inclusão social e melhoria das condições de vida” (ITS, 2004, p. 26). Essa definição reforça o caráter participativo e orientado para impacto social das Tecnologias Sociais.

Para Latour (2012), a tecnologia deve ser entendida como uma rede complexa de atores humanos e não humanos, cujas interações colaboram para a construção de efeitos sociais. Nesse sentido, os artefatos são expressões materiais de arranjos sociais, e as Tecnologias Sociais representam uma racionalidade alternativa, orientada à solidariedade e à sustentabilidade (DAGNINO; THOMAS; GOMES, 2004).

A Figura 11 a seguir, apresenta algumas características e elementos presentes em iniciativas de tecnologias sociais.

**Figura 11-** Características e elementos presentes em iniciativas de tecnologias sociais.



Fonte: Infonet, (2025)

Nesse contexto, as telhas de PEAD reciclado com grafeno podem ser inseridas como exemplo de tecnologia social, pois conciliam inovação, sustentabilidade e inclusão produtiva. Sua produção, baseada em resíduos plásticos, possibilita a geração de renda local e contribui para a mitigação de impactos ambientais.

Além disso, ao serem incorporadas a sistemas fotovoltaicos, essas telhas ampliam o acesso à energia limpa, reforçando seu caráter de inovação frugal orientada socialmente. Nesse sentido, tecnologias sociais constituem soluções construídas coletivamente que atendem a necessidades sociais concretas, promovendo inclusão e sustentabilidade (DAGNINO, 2010).

O conceito de **Tecnologia Social** (TS) estabelece quatro (4) dimensões:

**1.** Conhecimento, ciência, tecnologia A TS começa com problemas sociais; O ST está organizado e sistematizado; ST introduz ou gera inovação nas comunidades.

**2.** Participação, cidadania e democracia ST enfatiza a cidadania e a participação democrática; ST adota metodologia participativa nos processos de trabalho; ST promove sua divulgação e reaplicação.

**3.** A Educação ST realiza todo um processo pedagógico; A TS se desenvolve num diálogo entre o conhecimento popular e o científico; as comunidades, que ganham autonomia, apropriam-se do ST.

**4. Relevância social** A TS é eficaz na resolução de problemas sociais; ST é ambientalmente sustentável; ST traz transformação social. Até 2015, as tecnologias sociais contribuíram, de forma participativa e democrática, para os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) das Nações Unidas (ONU). Agora, com a Agenda 2030 da ONU e os seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), as tecnologias sociais são instrumentos importantes para a construção de um mundo mais justo, mais resiliente e sustentável (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024).

## **2.7 Tecnociência**

A Tecnociência refere-se à manipulação consciente dos processos de trabalho por um agente social, resultando na alteração do produto final conforme o contexto socioeconômico, as normas sociais e o ambiente de produção. Diferenciando-se da simples inovação e tecnologia, a Tecnociência destaca-se como abordagem flexível e adaptativa para a gestão de diversos conhecimentos, promovendo a apropriação de resultados pelos agentes sociais em busca de mudanças nos sistemas de produção e consumo.

Essa abordagem valoriza a propriedade coletiva dos meios de produção e a autogestão, visando atender às necessidades da comunidade por meio de redes de economia solidária (DAGNINO, 2020).

Idealizada como alternativa a termos como inovação (social, responsável, aberta) e tecnologia (social, sustentável), a Tecnociência pode ser entendida como um modo original, aberto, mutante e adaptativo de agenciar conhecimentos de qualquer natureza (científica, empírica, tecnológica, religiosa, ancestral) e origem (acadêmica, empresarial, povos originários, movimentos populares), por atores sociais que buscam a apropriação de resultados materiais decorrentes de mudanças nos processos de produção e consumo.

Essa apropriação respeita valores coletivos, como a propriedade compartilhada dos meios de produção e a autogestão, e orienta-se prioritariamente à satisfação de necessidades coletivas (DAGNINO, 2020). Em termos gerais, a Tecnociência pode ser descrita como a decorrência cognitiva da ação de um ator sobre um processo de trabalho que ele controla, permitindo

modificações no produto gerado em função das características do contexto socioeconômico, do acordo social e do espaço produtivo em que atua.

De forma mais simples, Tecnociência refere-se à modificação qualitativa ou quantitativa de um produto ou output resultante da ação de um ator social sobre um processo de trabalho sob seu controle, possibilitando a apropriação do resultado de acordo com seu interesse (DAGNINO, 2019).

[...] a decorrência cognitiva da ação de um coletivo de produtores sobre um processo de trabalho que, em função de um contexto socioeconômico, (que engendra a propriedade privada coletiva dos meios de produção) e de um acordo social (que legitima o associativismo) os quais ensejam, no ambiente produtivo, um controle (auto gestor) e uma cooperação (de tipo voluntário e participativo) provoca uma modificação no produto gerado cujo resultado material possa ser apropriado segundo a decisão do coletivo (DAGNINO, p. 61- 62).

Segundo Oliveira (2004), o conflito entre ciência e tecnologia é responsável por diversos problemas característicos da sociedade moderna. Ele argumenta que, no atual contexto de hegemonia liberal, a Tecnociência compartilha a responsabilidade por questões como fome, pobreza, violência e desigualdades sociais, além de contribuir para a degradação ambiental, incluindo o esgotamento de recursos naturais.

De acordo com Dagnino (2019), para emancipar a relação entre tecnologia e inovação no contexto capitalista — que produziu a Tecnociência a favor do capital — é pertinente adotar a perspectiva da Tecnociência solidária. Essa abordagem reconhece a origem da tecnologia no contexto capitalista e aponta possibilidades de modificação dos produtos por meio da cooperação e da participação, permitindo sua apropriação segundo decisões emancipatórias coletivas (SOUZA; MORAES, 2022).

O desenvolvimento e a inovação social na Tecnociência caracterizam-se por uma tensão entre o potencial transformador da tecnologia e as demandas por justiça social e sustentabilidade. Autores contemporâneos enfatizam a importância de orientar a Tecnociência para o bem comum, promovendo um desenvolvimento inclusivo e equitativo. A integração de considerações éticas e sociais é essencial para garantir que as inovações beneficiem toda a sociedade, e não apenas segmentos privilegiados.

Dagnino (2014) discute as tecnologias, questionando a produção de Tecnologias Convencionais (TC) pelas instituições, frequentemente isoladas da sociedade, segmentadas, padronizadas, hierarquizadas e monopolizadas. Essas tecnologias são apresentadas como “as

melhores” ou “de ponta”, tornando outras supostamente atrasadas ou obsoletas. Em contraste, a Tecnologia Social (TS) compreende produtos, técnicas ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas em interação com a comunidade, que representem soluções efetivas de transformação social (DAGNINO, 2008 apud ROCHA, 2022, p. 27).

Na obra *Tecnociência Solidária*, Dagnino (2007) aborda críticas e implicações políticas, sociais e econômicas da ciência e tecnologia (C&T) na sociedade capitalista. O autor desenvolve uma perspectiva crítica sobre o desenvolvimento tecnocientífico, contrapondo-se à visão convencional de neutralidade da ciência e da tecnologia.

Na figura a seguir, são apresentados os pontos críticos da Tecnociência, segundo análise de autores, destacando questões estruturais do modelo dominante que podem ser relacionadas e sintetizadas, Quadro 6.

**Quadro 6 – Críticas a Tecnociência, segundo autores**

| <b>Crítica</b>                                   | <b>Descrição / Efeitos</b>  | <b>Autor(es) / Citação</b>   |
|--|---|--|
| <b>1. Subordinação ao mercado e ao capital</b>   | A produção científica e tecnológica é guiada pelo lucro, não pelas necessidades sociais.                    | “A tecnociência é moldada pelas exigências do capital, resultando em um conhecimento funcional ao lucro e não à cidadania.” — <i>Dagnino, 2008</i> |
| <b>2. Privatização do conhecimento</b>           | O conhecimento é apropriado por meio de patentes e licenças, limitando o acesso e aumentando a dependência. | “A tecnociência naturaliza a apropriação privada do conhecimento e o transforma em mercadoria.” — <i>Dagnino, 2010</i>                             |
| <b>3. Desconexão com as necessidades sociais</b> | A ciência ignora problemas prioritários da maioria da população, voltando-se a mercados lucrativos.         | “A ciência não responde às demandas das populações marginalizadas, pois sua agenda é definida pelas elites econômicas.” — <i>Santos, 2004</i>      |
| <b>4. Exclusão dos saberes locais</b>            | Desvaloriza conhecimentos indígenas, populares e tradicionais, impondo um modelo único de ciência.          | “A tecnociência contribui para a destruição dos ecossistemas culturais.” — <i>Santos, 2009</i>   |
| <b>5. Concentração de poder e conhecimento</b>   | A inovação se concentra nos países ricos, perpetuando a dependência dos países periféricos.                 | “A tecnociência promove uma nova divisão internacional do trabalho científico.” — <i>Dagnino, 2008</i>   |
| <b>6. Fetichização da tecnologia</b>             | Apresenta a tecnologia como neutra e salvadora, escondendo seus impactos sociais e políticos.               | “A ilusão tecnocrática mascara os conflitos sociais ao apresentar a técnica como neutra.” — <i>Feenberg, 2010</i>                                  |

**Fonte:** Autor, (2025)

Diante das críticas apontadas por Latour (2020), torna-se evidente que a Tecnociência não pode ser compreendida apenas como produção de conhecimento e inovação tecnológica, mas deve ser analisada em suas dimensões sociais e ambientais. Essa perspectiva evidencia a necessidade de integrar práticas tecnocientíficas com objetivos de desenvolvimento inclusivo, considerando os impactos sobre comunidades e a promoção da equidade.

Assim, a reflexão sobre Tecnociência solidária e suas implicações oferece uma ponte natural para a discussão sobre Desenvolvimento e Inclusão Social, destacando como o avanço tecnológico pode e deve ser orientado para gerar benefícios coletivos e reduzir desigualdades.

## **2.8 Desenvolvimento e Inclusão Social**

Sob a lógica capitalista, as inconsistências no processo de desenvolvimento podem intensificar desigualdades sociais, ao mesmo tempo em que abrem espaço para inovações que se apresentam como promotoras de inclusão. Os artefatos, nesse contexto, não se reduzem a instrumentos técnicos: configuram-se como agentes de transformação social, pois mobilizam práticas, tecnologias e saberes capazes de ampliar oportunidades e fortalecer a participação de grupos historicamente marginalizados.

As telhas de PEAD reciclado com grafeno, ao reunirem sustentabilidade, menor custo e potencial de geração de energia limpa, inscrevem-se no campo da inovação frugal. Como tal, possuem capacidade de ampliar o acesso à energia e contribuir para uma matriz energética mais democrática. Entretanto, esse potencial inclusivo é atravessado por contradições: ainda que se configurem como artefatos de inclusão, as dificuldades de financiamento e as barreiras estruturais impõem limites à sua difusão, o que restringe seu alcance social imediato.

Arrighi (1997) observa que o capitalismo tende a gerar inovações que rompem ordens pré-estabelecidas, e Schumpeter entende a inovação como elemento que desloca a economia de um estado estacionário para uma fase de expansão. Contudo, a perspectiva de Braga (2010), ao aproximar Schumpeter de Weber, permite problematizar essa visão: a inovação não pode ser entendida apenas como ação de um indivíduo empreendedor, mas como fenômeno social, coletivo, influenciado por hábitos, cultura e instituições. Essa leitura desloca o olhar da mera lógica de mercado para as dimensões sociais que a inovação pode ou não alcançar.

É justamente nesse ponto que emerge a contradição central: ainda que o artefato analisado possua caráter de tecnologia social, sua apropriação por grupos mais vulneráveis depende de condições materiais que não estão plenamente garantidas. Como aponta Sen (2001), as chamadas facilidades econômicas, que deveriam assegurar oportunidades de consumo, produção e troca, são frequentemente negligenciadas. Sem tais facilidades, outras liberdades instrumentais — políticas, sociais, de transparência e de segurança — acabam igualmente comprometidas.

Neste sentido, é importante enfatizar a falta da chamada oportunidade social. A Lei 14.300/2022, ao instituir tarifas para pequenos geradores de energia, como os sistemas residenciais, comprometeu a expansão da geração distribuída.

Embora os “microgeradores” que instalaram seus sistemas antes da promulgação da lei tenham ficado isentos até 2045, aqueles que vislumbram implantar novas soluções, como painéis solares ou telhas de PEAD reciclado com grafeno, acabam prejudicados, o que compromete o caráter inclusivo desses artefatos.

Essa realidade dialoga com a análise de Arrighi (1997) em *A Ilusão do Desenvolvimento*, quando observa que o capitalismo reproduz dicotomias centro-periferia, semelhantes às de Wallerstein (1999). Assim, o que parece avanço tecnológico pode se revelar um mecanismo de manutenção das desigualdades, já que a ascensão econômica de alguns setores ocorre em detrimento da exclusão de outros. A inovação frugal, embora difundida em países emergentes como China e Índia, também desperta interesse em países desenvolvidos, revelando a ambivalência entre sua lógica inclusiva e sua apropriação pelo mercado global.

Essa contradição se aprofunda quando associamos desenvolvimento a crescimento econômico. Como lembra Pimenta (2014), ainda persiste a confusão entre desenvolvimento e industrialização, mensurados pelo PIB per capita. Nessa lógica, empresas passam a protagonizar combinações de insumos e produtos que aumentam competição e renda, mas, ao mesmo tempo, reforçam a acumulação desigual. A inovação, assim, pode assumir tanto um caráter emancipador quanto excludente, dependendo do contexto de acesso e apropriação.

Exemplo disso ocorre quando o Estado, ao realizar obras de infraestrutura, privilegia grupos mais abastados, limitando o acesso da população mais humilde a espaços urbanos e de lazer. Esse “artefato-estrutura”, ao invés de inclusivo, se converte em barreira, reforçando desigualdades. Como afirma Liberati (2013), cabe ao Estado a responsabilidade de executar políticas públicas para

atender demandas sociais. Todavia, na prática, o desenvolvimento estatal muitas vezes se estrutura de forma seletiva e excludente.

Para Pimenta (2014), não há como conceber desenvolvimento sem considerar o papel do Estado, do território e das instituições. Entretanto, como adverte Arrighi (1997), apenas uma minoria da população mundial usufrui de riqueza democrática, conquistada por lutas contra as tendências excludentes do capitalismo. Assim, a tentativa de uniformizar periferia e centro revela-se utópica, reforçando a crítica de que o desenvolvimento capitalista se assenta em ilusões estruturais.

Essas contradições tornam urgente refletir sobre alternativas de desenvolvimento que transcendam o reducionismo econômico. Os artefatos sociais, como as telhas de PEAD reciclado com grafeno, surgem nesse debate como ferramentas capazes de combinar sustentabilidade e inclusão. No entanto, seu potencial só será efetivo se acompanhado por políticas públicas e mecanismos de acesso que garantam equidade social. Como destaca Sen (2001), o verdadeiro desenvolvimento está na ampliação das liberdades humanas, que incluem não apenas facilidades econômicas, mas também políticas, sociais e protetivas.

Seguindo a perspectiva de Amartya Sen, o desenvolvimento só pode ser efetivamente alcançado quando associado à liberdade e à democracia. Esse entendimento desloca o foco do crescimento econômico para a valorização das capacidades humanas, mostrando que a acumulação de riquezas não basta para promover inclusão social.

O conflito entre capitalismo e construções sociais é histórico e complexo, revelando tensões entre eficiência econômica e justiça social, crescimento e sustentabilidade, poder econômico e participação democrática. Embora o capitalismo tenha impulsionado a inovação, também produziu desigualdades profundas e desafios ambientais. Nesse cenário, as construções sociais buscam equilibrar tais impactos, promovendo práticas de coesão, bem-estar coletivo e justiça social.

Exemplos disso são os sistemas de proteção social, direitos trabalhistas, políticas de inclusão e redistribuição de renda. Essas iniciativas contrariam a lógica estrita do lucro ao promover equidade e participação democrática. Contudo, muitas vezes as políticas públicas são moldadas pelos interesses de mercado, deixando de lado demandas vitais, como pesquisas em saúde pública ou tecnologias acessíveis para populações vulneráveis.

Essa contradição se evidencia também nos artefatos. Latour lembra que eles não são passivos, mas agentes que moldam relações sociais em redes sociotécnicas. Hughes, ao falar dos sistemas sociotécnicos, reforça que os artefatos são moldados por fatores culturais, políticos e econômicos. Assim, podem ser emancipadores — como as telhas de PEAD reciclado com grafeno — ou excludentes, como as câmeras de vigilância usadas como mecanismos de controle social, ou ainda a distribuição de conversores digitais, que, sob a aparência de equidade, apenas tornaram mais explícitas as desigualdades existentes.

Nesse sentido, Sen (2000) mostra que a pobreza vai além da ausência de renda: trata-se de privações múltiplas, envolvendo saúde, educação, moradia e direitos. Assim, artefatos só poderão ser agentes de inclusão quando associados a políticas públicas equitativas. Sachs reforça essa visão ao propor um desenvolvimento sustentável que integre dimensões econômicas, sociais e ambientais.

O desafio está em transformar os artefatos em ferramentas de inclusão social e sustentabilidade. Isso exige participação comunitária em projetos de desenvolvimento, práticas duradouras como o uso de energias renováveis e políticas estatais que incentivem tecnologias de baixo impacto ambiental. Mais que isso, demanda solidariedade internacional e cooperação entre países para enfrentar pobreza e mudanças climáticas.

A Agenda 2030 da ONU traduz esse desafio em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), voltados à erradicação da pobreza, à proteção do planeta e à garantia de prosperidade para todos. Nesse quadro, os artefatos podem ser entendidos como “artefatos de soluções”, essenciais para operacionalizar metas globais em contextos locais.

Assim, produzir e consumir de forma sustentável implica adotar tecnologias que usem menos recursos e reduzam impactos ambientais. Na dimensão social, significa garantir justiça e equidade, assegurando o mínimo necessário para todos viverem com dignidade. Os artefatos, quando inclusivos e acessíveis, tornam-se instrumentos centrais para reduzir desigualdades e ampliar a participação cidadã.

Portanto, o desenvolvimento, a inovação e os artefatos moldam o futuro da sociedade, influenciando economia, saúde, educação, sustentabilidade e governança. Eles oferecem oportunidades para inclusão social, mas também apresentam riscos se subordinados apenas à lógica

de mercado. O desafio está em equilibrar inovação e justiça social, progresso econômico e sustentabilidade ambiental, garantindo que o avanço tecnológico seja orientado para o bem comum.

Diante dessas contradições entre capitalismo, construções sociais e artefatos, percebe-se que a inclusão social só se torna efetiva quando associada à sustentabilidade. O desenvolvimento precisa integrar dimensões sociais, econômicas e ambientais, garantindo acesso equitativo a oportunidades.

Nesse sentido, os artefatos, como as telhas de PEAD reciclado com grafeno, ultrapassam a condição técnica e se tornam instrumentos de sustentabilidade. Assim, ao avançarmos para o próximo capítulo, aprofunda-se a reflexão sobre como o desenvolvimento sustentável, pautado pelos ODS da Agenda 2030, pode oferecer caminhos mais justos e inclusivos.

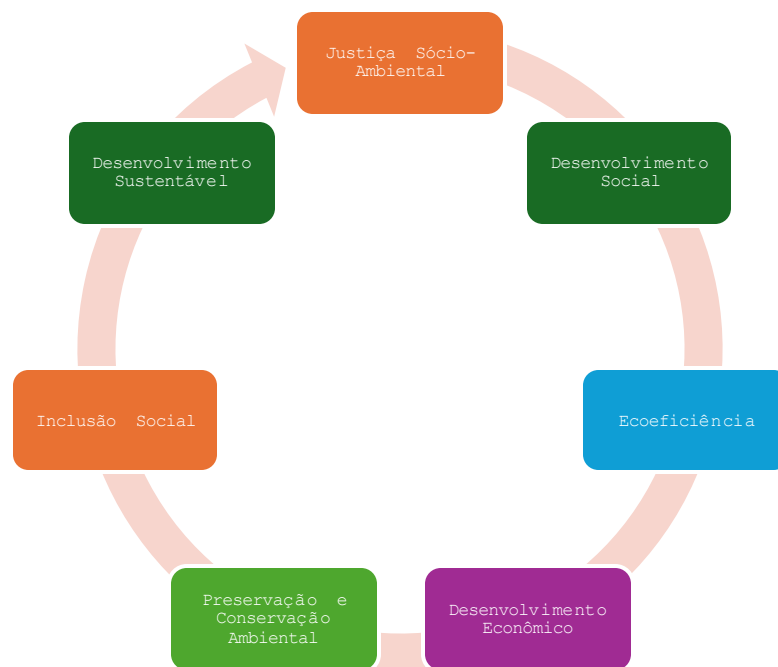
## **2.9 Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável**

A sustentabilidade é um conceito intimamente relacionado a três pilares fundamentais: social, ambiental e econômico. Esses pilares, em conjunto, garantem as condições de manutenção da vida no planeta e estão diretamente vinculados ao conceito de desenvolvimento sustentável. Este, por sua vez, é definido como a capacidade de atender às necessidades das gerações presentes sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi formalmente apresentado pela primeira vez no Relatório Brundtland (1987), tornando-se referência central para políticas públicas e estratégias de planejamento em nível global. Assim, a sustentabilidade não se limita à preservação ambiental, mas integra dimensões sociais e econômicas, evidenciando a necessidade de ações articuladas e equilibradas para o progresso contínuo da sociedade.

A Figura 12 a seguir, apresenta os pilares para o desenvolvimento sustentável, fundamentos estes teóricos que norteiam, a busca por um futuro equilibrado.

**Figura 12 - Princípios do Desenvolvimento Sustentável – ODS – ONU.**



**Fonte:** Autor, (2025)

Seguindo essa premissa, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, em 2015, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que compõem uma agenda mundial voltada à construção e implementação de políticas públicas para guiar a humanidade até 2030.

A agenda inclui um plano de ação internacional para o alcance dos 17 ODS, desdobrados em 169 metas, abordando diversos temas fundamentais para o desenvolvimento humano. Esses objetivos são organizados em cinco perspectivas interdependentes: pessoas, planeta, prosperidade, parceria e paz, Figura 13.

**Figura 13** - Áreas de Importância das ODS – ONU.



Fonte: Fundação Oswaldo Cruz, (2024).

Este modo de desenvolvimento tem sido defendido pela Organização das Nações Unidas (ONU), desde da Cúpula de Nova York em 2015, quando o então Secretário-geral, Ban Ki-moon, disse: “O acordo abrange uma agenda universal, transformadora e integrada (...) Esta é a Agenda do Povo, um plano de ação para acabar com a pobreza em todas as suas dimensões, de forma irreversível, em todos os lugares, não deixando ninguém para trás” (ONU, 2015).

O que se observou e condiz com a realidade analisada por Amartya Sen, que mesmo em países muito ricos economicamente existem grupos com expectativa e qualidade de vida inferior, para os quais a segurança econômica não é uma realidade, e em países com problemas democráticos, a situação de desigualdade é ainda maior (SEN, 1999).

O desenvolvimento sustentável implica garantir que as necessidades do presente sejam atendidas sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem as suas próprias, o que envolve assegurar equidade social e justiça distributiva. Isso significa ampliar o acesso a recursos essenciais, como saúde, educação, alimentação e habitação, de modo a reduzir desigualdades e assegurar uma vida digna para todos (BRUNDTLAND, 1987, p. 43).

Nascimento (2019) conceitua o desenvolvimento sustentável em três dimensões:

A primeira dimensão do desenvolvimento sustentável normalmente citada é a ambiental. Ela supõe que o modelo de produção e consumo seja compatível com a base material em que se assenta a economia, como subsistema do meio natural. Trata-se, portanto, de produzir e consumir de forma a garantir que os ecossistemas possam manter sua auto reparação ou capacidade de resiliência.

A segunda dimensão, a econômica, supõe o aumento da eficiência da produção e do consumo com economia crescente de recursos naturais, com destaque para recursos permissivos como as fontes fósseis de energia e os recursos delicados e mal distribuídos, como a água e os minerais. Trata-se daquilo que alguns denominam como eco eficiência, que supõe uma contínua inovação tecnológica que nos leve a sair do ciclo fóssil de energia (carvão, petróleo e gás) e a ampliar a desmaterialização da economia.

A terceira e última dimensão é a social. Uma sociedade sustentável supõe que todos os cidadãos tenham o mínimo necessário para uma vida digna e que ninguém absorva bens, recursos naturais e energéticos que sejam prejudiciais a outros. Isso significa erradicar a pobreza e definir o padrão de desigualdade aceitável, delimitando limites mínimos e máximos de acesso a bens materiais. Em resumo, implantar a velha e desejável justiça social (ZEIFERT *et al.*, 2020)

Para compreender como é traduzido um conceito que tem a função de determinar um modo de organização social e um modelo de socialização, observa-se que o uso do termo sustentabilidade aparece mais diretamente associado às inovações tecnocientíficas, que assumem uma função estruturante entre os vetores de força, descritos como ordens de conservação e dinâmicas de transformação, o que vem a caracterizar uma estrutura molar para o conceito de sustentabilidade.

Assim, o elemento comunicativo da sustentabilidade é a Tecnociência e suas inovações, tendo como referência valências que ora pendam para os efeitos positivos da Tecnociência junto à sociedade, ora para os efeitos negativos. Desse modo, encontramos na Tecnociência um vetor que tenciona as ordens de conservação e as dinâmicas de transformação do mundo.

## **2.10 Economia Circular - EC**

A Economia Circular tem ganhado destaque no Brasil como um modelo de desenvolvimento sustentável, voltado a reduzir a pressão sobre os recursos naturais e minimizar os impactos ambientais. Esse conceito contrasta com o modelo linear tradicional de “extrair, produzir, usar e descartar”, ao buscar a manutenção de materiais e produtos em circulação pelo maior tempo possível, por meio de estratégias como reutilização, reciclagem, remanufatura e inovação no design dos produtos (CARDOSO, 2022).

Cardoso (2022) destaca que a Economia Circular, quando articulada à Inovação Frugal, promove de forma sinérgica e otimizada a utilização de recursos, desenvolvendo soluções de menor custo e contribuindo para sustentabilidade e inclusão social. Nesse sentido, o desenvolvimento de artefatos projetados com recursos reduzidos facilita o reaproveitamento e a reciclagem de materiais, prolongando o ciclo de vida dos produtos e aumentando sua eficiência.

Exemplos práticos desse conceito incluem artefatos como as telhas de PEAD reciclado com grafeno, que aceleram a transição para modelos circulares. Tais produtos possibilitam o reaproveitamento de materiais, prolongam a vida útil dos produtos e demonstram como inovações tecnocientíficas podem integrar sustentabilidade, economia de recursos e inclusão social, alinhando-se aos princípios da Economia Circular.

**Figura 14** - Economia Circular e suas perspectivas de aplicação em toda cadeia produtiva circular



**Fonte:** *Green Building* Brasil, (2019)

A Economia Circular vem sendo cada vez mais discutida e aplicada em diversos setores, desde a indústria até a agricultura. No entanto, essa transição ainda se encontra em fases iniciais no Brasil, enfrentando desafios específicos, como desigualdade social e infraestrutura insuficiente para a gestão de resíduos.

Segundo Lima e Jabbour (2021), a Economia Circular no Brasil ainda está em estágio emergente, com iniciativas pontuais em diferentes setores, mas sem adoção ampla e sistemática. Para que o modelo se consolide, é necessária uma articulação entre políticas públicas, empresas e sociedade civil, criando um ambiente propício à inovação circular.

Leite et al. (2022) destacam que a implementação da Economia Circular no país enfrenta barreiras regulatórias, ausência de incentivos fiscais para práticas sustentáveis e necessidade de maior engajamento de empresas e consumidores. Contudo, o Brasil apresenta oportunidades

significativas, especialmente devido à sua riqueza em biodiversidade e recursos naturais, que podem ser exploradas nos setores de agricultura e bioeconomia.

A adoção de práticas circulares na agricultura pode aumentar a eficiência no uso de recursos, além de contribuir para a conservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas. Souza et al. (2021) enfatizam que a falta de infraestrutura para reciclagem e gestão eficiente de resíduos é um dos principais desafios do país, que gera grandes volumes de resíduos sólidos urbanos, mas apresenta baixas taxas de reciclagem.

Nesse contexto, a Economia Circular oferece caminhos para melhorar a gestão de resíduos e promover inclusão social, integrando catadores e pequenas cooperativas ao ciclo produtivo. Produtos como as telhas de PEAD reciclado com grafeno exemplificam essa lógica, transformando resíduos plásticos em materiais de alto valor agregado, gerando benefícios ambientais e sociais.

O papel das políticas públicas é crucial para impulsionar a Economia Circular no Brasil. Silva e Araújo (2021) destacam que a ausência de legislação específica que incentive práticas circulares constitui um dos principais entraves. Os autores sugerem que medidas como ampliação da responsabilidade estendida do produtor, subsídios para tecnologias limpas e incentivos fiscais para empresas sustentáveis são fundamentais para viabilizar a transição para uma economia circular no país.

A inovação é um elemento central para a transição para a Economia Circular. Segundo Santos e Oliveira (2021), a adoção de tecnologias digitais, como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial, pode facilitar a rastreabilidade dos materiais, otimizar processos produtivos e reduzir o desperdício.

Essas inovações, quando associadas a inovações materiais, como o uso do grafeno em produtos reciclados, ampliam as possibilidades de aplicação em construções e outros setores, contribuindo para a criação de cadeias de valor mais sustentáveis e eficientes.

Portanto, a economia circular estabelece o contexto para analisar casos concretos de inovação tecnológica voltada à sustentabilidade. Nesse sentido, as telhas de PEAD reciclado com grafeno exemplificam como princípios circulares podem ser aplicados na prática, transformando resíduos plásticos em produtos de alto valor agregado.

Então, prolongar o ciclo de vida dos materiais e reduzir impactos ambientais, são inovações que contribuem para a inclusão social, ao gerar oportunidades econômicas para cooperativas de

catadores e pequenas empresas. Assim, o estudo desses artefatos evidencia a articulação entre tecnologia, economia circular e justiça social, consolidando um modelo de desenvolvimento sustentável que integra eficiência, inovação e responsabilidade ambiental.

## **2.11 As telhas de PEAD reciclado com grafeno, inovação frugal, sustentável e circular**

A inovação frugal caracteriza-se pela proposição de soluções que atendem a necessidades essenciais com custos reduzidos, menor complexidade tecnológica e foco em contextos de restrição de recursos. Trata-se de uma abordagem que busca “fazer mais com menos”, assegurando acessibilidade e funcionalidade para populações frequentemente excluídas de tecnologias convencionais (WEYRAUCH; HERSTATT, 2017; PRABHU; RADJOU, 2017).

As telhas de polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado com adição de grafeno atendem diretamente aos princípios da inovação frugal, pois utilizam resíduos plásticos como matéria-prima, diminuindo a dependência de insumos virgens e os custos de produção. Estudos recentes demonstram a viabilidade estrutural de telhas e painéis produzidos com PEAD reciclado, com desempenho satisfatório para uso em coberturas (DAS et al., 2025).

Essas telhas articulam as três dimensões da sustentabilidade. Na dimensão econômica, ao utilizar resíduos como matéria-prima, reduzem custos de produção e aumentam a acessibilidade, alinhando-se aos princípios da inovação frugal (WEYRAUCH; HERSTATT, 2017). Na dimensão ambiental, estimulam a reciclagem do PEAD, desviando resíduos de aterros, diminuindo a extração de matérias-primas e incorporando a lógica da economia circular (KALALI et al., 2023).

Na dimensão social, a produção descentralizada pode gerar trabalho, renda e inclusão social, ampliando impactos positivos além do aspecto técnico (PRABHU; RADJOU, 2017). Sob a ótica da economia circular, a transformação de resíduos plásticos em telhas representa uma estratégia de valorização de materiais, reinserindo-os na cadeia produtiva, reduzindo a extração de recursos tradicionais e mitigando impactos ambientais (KALALI et al., 2023).

Por fim, ao possibilitar produção descentralizada e de baixo custo, as telhas de PEAD reciclado com grafeno contribuem para a geração de renda, inclusão social e fortalecimento de economias locais. Esses aspectos sociais reforçam a relação entre inovação tecnológica e

desenvolvimento comunitário, evidenciando como a inovação frugal pode integrar sustentabilidade, justiça social e eficiência econômica (PRABHU; RADJOU, 2017).

Dessa forma, a análise das telhas de PEAD reciclado com grafeno evidencia como a inovação frugal e os princípios da economia circular orientam a escolha de materiais sustentáveis, eficientes e socialmente inclusivos. Essa perspectiva reforça a importância de selecionar matérias-primas que atendam simultaneamente às dimensões econômica, ambiental e social, garantindo desempenho técnico adequado e viabilidade estrutural.

## **2.12 Seleção de Materiais**

Os produtos alcançam sucesso por meio de uma combinação de design técnico sólido e criatividade industrial no projeto. Esse amálgama define o caráter do produto, refletido na forma como materiais e processos são utilizados para fornecer funcionalidade, usabilidade e satisfação nas propriedades. A funcionalidade é fortemente influenciada pela estética, pelas associações e pelas percepções que o produto carrega, uma combinação que pode ser denominada como personalidade do produto.

O caráter geral de um produto resulta da síntese entre funcionalidade, usabilidade e personalidade (ASHEVY; JOHNSON, 2003). As propriedades dos materiais determinam a capacidade estrutural de um componente, orientam o processo de fabricação e definem sua aplicabilidade em diferentes contextos (RIBEIRO; SORBILE, 2023).

No caso das telhas de PEAD reciclado com grafeno, a escolha adequada dos materiais é fundamental para garantir desempenho mecânico, durabilidade e compatibilidade com processos de produção sustentáveis. A análise das propriedades do PEAD e do grafeno permite otimizar resistência, leveza e estabilidade dimensional, integrando critérios técnicos e econômicos à lógica da economia circular. Assim, a seleção de materiais não apenas assegura funcionalidade e segurança, mas também reforça os princípios da inovação frugal e da sustentabilidade social e ambiental.

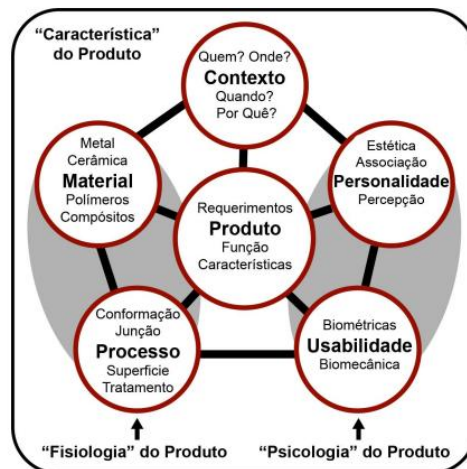
**Figura 15** - Distinção entre as características de funcionalidade, usabilidade e satisfação dos produtos como função da distinção entre Projeto Técnico e Desenho Industrial



Fonte: Ashby, Jhonson (2003)

A partir desta distinção constroem um conjunto de métodos centrado nos atributos de percepção de materiais e processos de fabricação, com analogia entre aspectos, fisiológicos e psicológicos, Figura 16.

**Figura 16** - Distinção e analogia entre aspectos “fisiológicos” e “psicológicos” para explicitar a distinção entre os aspectos materiais e imateriais dos produtos.



Fonte: Ashby, Jhonson (2003)

Ao formular um método de seleção de materiais e processos de fabricação voltado ao Design Industrial (Industrial Design), Ashby & Johnson (2003) analisam a metodologia de projeto de produto, destacando a importância do design na criação da personalidade dos produtos. Os autores estabelecem uma distinção clara entre os aspectos construtivos e funcionais dos produtos e os aspectos de percepção e usabilidade, atribuídos especificamente ao Design Industrial.

No caso das telhas de PEAD reciclado com grafeno, a escolha adequada dos materiais é fundamental para garantir desempenho mecânico, durabilidade e compatibilidade com processos de produção sustentáveis. A análise das propriedades do PEAD e do grafeno permite otimizar resistência, leveza e estabilidade dimensional, integrando critérios técnicos e econômicos à lógica da economia circular. Assim, a seleção de materiais não apenas assegura funcionalidade e segurança, mas também reforça os princípios da inovação frugal e da sustentabilidade social e ambiental.

### **2.13 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)**

O Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é um tipo de plástico amplamente utilizado devido às suas propriedades físicas e químicas. É conhecido por sua resistência, rigidez e durabilidade, características que o tornam ideal para diversas aplicações. Suas propriedades incluem alta densidade, conferindo maior peso e resistência em comparação a outros tipos de polietileno, e resistência a produtos químicos, tornando-o adequado para o armazenamento de substâncias corrosivas.

Essas características justificam o interesse pelo PEAD na fabricação do artefato em estudo, especialmente com a incorporação de grafeno. Estima-se que a produção de 1 kg de PEAD demande cerca de 1,75 kg de petróleo em termos de energia e matéria-prima fóssil. A reciclagem do material pode economizar entre 50% e 70% de energia em relação à produção de plástico virgem, e estudos industriais demonstram que, sob condições controladas, o PEAD pode ser reciclado sucessivamente até aproximadamente 10 ciclos sem perda significativa de propriedades (KUMAR, 2011; EPA, s.d.; RESOURCE-RECYCLING, 2018; MANSANO; PAVELOSKI; PINTO, 2019).

A reciclagem elimina a necessidade de maior extração de petróleo, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais. Além disso, insere-se na lógica da economia circular, que busca otimizar o uso de recursos e reduzir a geração de resíduos.

No Quadro 7, são apresentadas algumas características do PEAD que justificam seu uso como material de interesse na fabricação do artefato em estudo. A incorporação de grafeno à sua estrutura possibilita a produção de telhas mais resistentes e eficientes, contribuindo para sustentabilidade, otimização do uso de materiais e potencial geração de energia.

**Quadro 7:** Características e propriedades mecânicas do PEAD

|  |
|--|
| <b>Resistência Mecânica</b><br>Impacto, tração e abrasão |
| Resistência química (corrosão galvânica, por exemplo)    |
| A toxicidade   |
| Impermeabilidade   |
| Flexibilidade  |
| Leveza (densidade aproximada de 0,95g/cm <sup>3</sup> )  |
| Adaptabilidade   |
| Durabilidade superior                                    |

Fonte: Autor, (2025)

## 2.14 Grafeno

O interesse tecnológico sempre motivou o ser humano na busca por novas ferramentas, avançando em diversas áreas. Por meio de pesquisas, surgiram meios de extrair elementos presentes na natureza, mas anteriormente inacessíveis. Esse avanço possibilitou o máximo aproveitamento de elementos como o carbono, que hoje é explorado em diferentes alótropos. Tal aproveitamento só se tornou viável com o desenvolvimento da nanotecnologia, que confere maior eficiência a materiais frequentemente utilizados na engenharia, como o grafeno.

O grafeno é um composto descoberto em 2004 pela Universidade de Manchester, cuja descoberta rendeu aos pesquisadores André Geim e Konstantin Novoselov o prêmio Nobel de Física em 2010. Atualmente, o material é aplicado em produtos como telhas solares, painéis fotovoltaicos e baterias. No entanto, o grafeno ainda é pouco difundido, sendo necessário ampliar

estudos que documentem suas características e considerem seu ciclo de vida (SANTOS; ARAÚJO, 2022).

Segundo Li, Monticelli e Zanelli (2022) e Ribeiro (2024), o grafeno está sendo utilizado experimentalmente em telhas solares, células fotovoltaicas e eletrodos transparentes modificados. Apesar de existirem estudos de revisão e usos pilotos, há insuficiência de trabalhos que avaliem de forma abrangente suas propriedades, especialmente considerando análises de ciclo de vida.

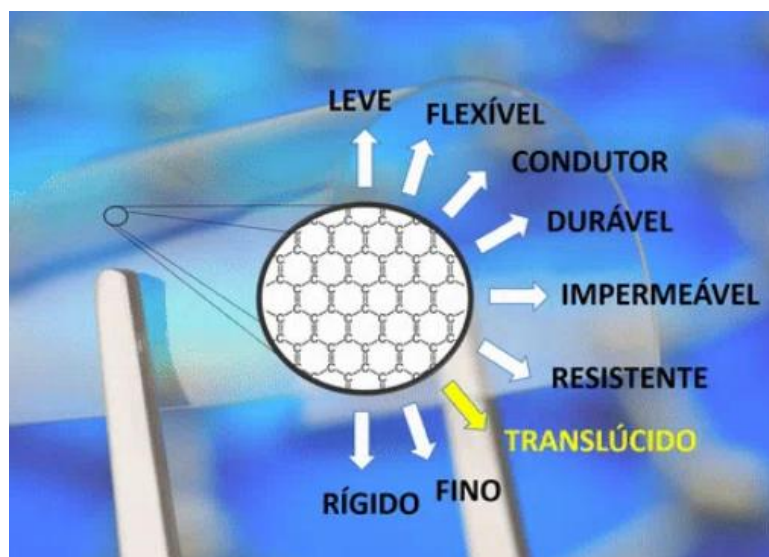
O grafeno é uma das formas cristalinas do carbono, assim como o diamante, o grafite, os nanotubos de carbono e os fulerenos. O termo “grafeno” foi proposto por Hanns-Peter Boehm, combinando “grafite” e o sufixo “-eno”. Ele consiste em uma camada plana de átomos de carbono organizados em uma estrutura hexagonal, com apenas um átomo de espessura, sendo o primeiro material bidimensional (“2D”) disponível para uso científico e tecnológico (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021).

Embora o termo também seja usado para materiais com múltiplas camadas, defeitos estruturais ou funcionalizações, esses apresentam parâmetros específicos que diferem da definição teórica. O grafeno impulsionou pesquisas sobre outros materiais 2D, cujas propriedades podem ser exploradas em diversas aplicações. No longo prazo, a combinação de camadas heterogêneas desses materiais pode gerar produtos finais de alto desempenho.

As propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e ópticas do grafeno superam muitos materiais convencionais. Além disso, essas qualidades podem ser combinadas e engenheiradas em um único material, componente ou sistema, tornando suas aplicações promissoras tanto para aprimorar tecnologias existentes quanto para desenvolver tecnologias disruptivas.

Essencialmente, o grafeno consiste em uma folha de átomos de carbono dispostos em estrutura hexagonal, semelhante a favos de mel, sendo um alótropo do carbono (ARAÚJO, 2022). Suas propriedades incluem resistência superior à do diamante, cerca de 200 vezes mais resistente que o aço, maior condutividade que o cobre, elevada mobilidade de elétrons em relação ao silício e transparência (SUN; SHI; WU, 2011). A Figura a seguir apresenta algumas propriedades do grafeno.

**Figura 17** - Propriedades mecânicas e físicas do Grafeno



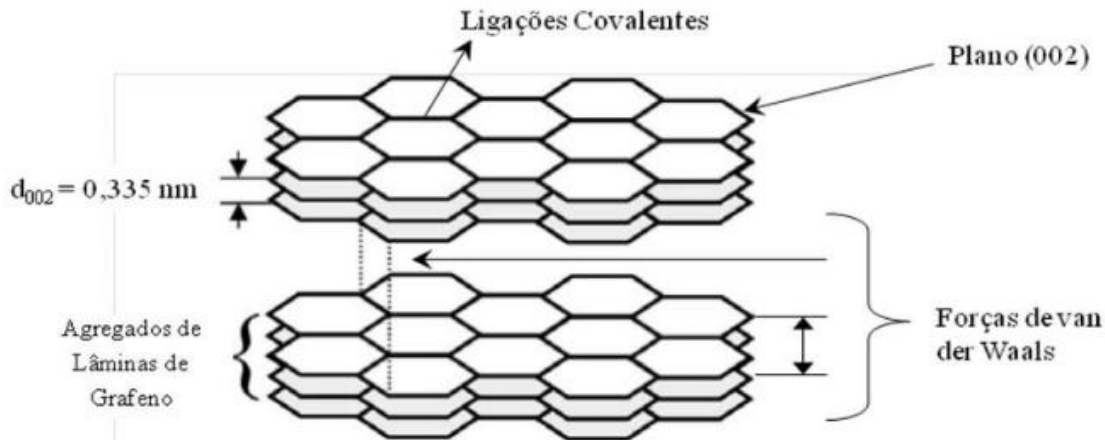
**Fonte:** Toda Matéria (2024)

O grafeno é considerado o material mais fino existente, sendo aproximadamente 1.000 vezes mais fino que um fio de cabelo, e apresenta propriedades notáveis, como alta condutividade térmica, excelente resistência mecânica e propriedades eletrônicas superiores. Essas características contribuem para sua aplicação em painéis solares, sensores, supercapacitores, compósitos com memória de forma, biomateriais, entre diversos outros usos em múltiplas áreas do conhecimento (WANG; ASLANI, 2019).

É considerado o material mais fino existente, sendo 1000 vezes mais fino que um fio de cabelo, com propriedades notáveis, como alta condutividade térmica, propriedades mecânicas superiores e excelentes propriedades eletrônicas, contribuindo para seu uso em painéis solares, sensores, super capacitores, compósitos com memória de forma, biomateriais, entre muitos outros em diversas áreas do conhecimento. (WANG, ASLANI, 2019)

As ligações carbono-carbono são as ligações mais fortes encontradas na natureza, em que cada carbono se junta a outros 3 na estrutura. Portanto, a hibridização do átomo é  $sp^2$ , que correspondem a 2 ligações simples e 1 ligação dupla.

**Figura 18** - Estrutura Cristalina e suas ligações químicas do Grafite

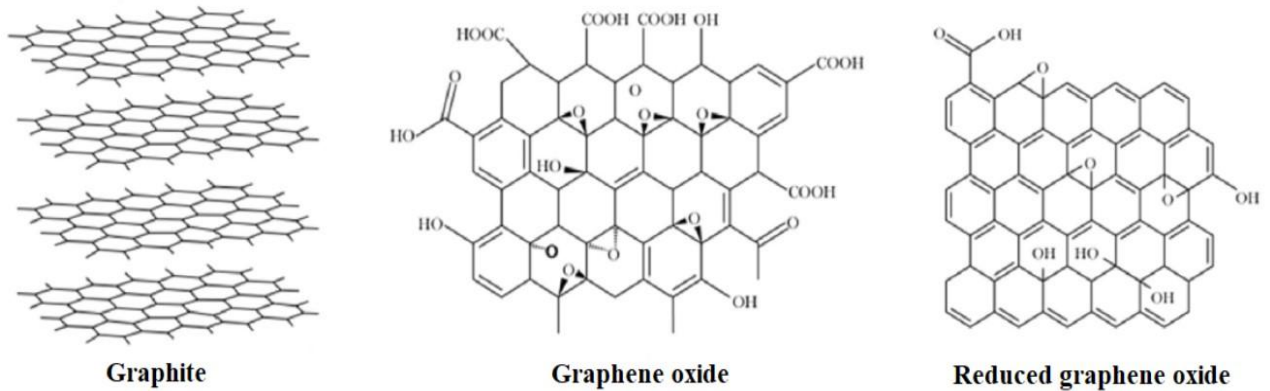


Fonte: The Journal of Engineering (2020)

Devido às suas extensas reservas de grafite, países como Brasil, China e Turquia apresentam um potencial empolgante para a produção de Grafeno e derivados de grafite, um material que está sendo profundamente estudado devido às suas propriedades únicas, há um grande potencial para seu uso em todo o mundo.

Assim, estudos relacionados a processos de obtenção mais baratos e com maior rendimento, permitindo sua produção em escala industrial, vêm crescendo exponencialmente, assim como estudos contribuindo com novas técnicas de caracterização desses materiais ou mesmo para o aprimoramento das técnicas atuais.

**Figura 19** - Estrutura de grafite, óxido de Grafeno e óxido de Grafeno reduzido (rGO).



**Fonte:** Fenner et. al., 2024

**Figura 20** - Aplicação do Grafeno conforme a estrutura:

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
|    |    |   |   |
| <p><b>Monocamada</b></p> <p>Formado por uma única folha de átomos de carbono, tem propriedades eletrônicas excepcionais. Ideal para dispositivos que exigem alta eficiência e desempenho, como células solares, semicondutores e supercapacitores</p> | <p><b>Poucas camadas</b></p> <p>Com três a 10 camadas, tem maior flexibilidade em algumas aplicações do que o grafeno monocamada. Usado em dispositivos eletrônicos, sensores e como aditivo para melhorar propriedades mecânicas e elétricas</p> | <p><b>Nanoplacas</b></p> <p>São empregadas em compósitos para reforço de materiais, tintas condutoras e aditivos em plásticos, bem como em cimentos e concretos. Aumentam a resistência e a condução elétrica dos materiais</p> | <p><b>Óxido de grafeno</b></p> <p>É o grafeno contendo átomos de oxigênio. Material mais versátil, serve para uma ampla gama de aplicações, como baterias, sensores químicos, sistemas de tratamento de água, entre outros</p> |

**Fonte:** Pesquisa Fapesp (2024)

## 2.14.1 Método de Produção

Devido ao rápido crescimento do interesse no Grafeno, o desenvolvimento produziu toda uma gama de diferentes métodos de fabricação. Os processos de síntese mais importantes do Grafeno incluem:

- Redução de óxido de Grafeno
- Esfoliação química e mecânica
- Deposição química de vapor (CVD)
- Crescimento epitaxial sobre carboneto de silício

Devido às suas propriedades excepcionais, o grafeno tem sido amplamente estudado para diversas aplicações, incluindo eletrônica de alta frequência (superando limites físicos de transmissão de dados do silício, por exemplo), amplificação de sinais, eletrônica transparente e flexível, sensores ultra-sensitivos, armazenamento e produção de energia (como aprimoramento de baterias e painéis solares), membranas de alta eficiência para purificação de água ou separação de elementos, dissipadores de calor, filmes protetores e materiais mais leves e resistentes.

Tais qualidades podem gerar impactos positivos significativos em múltiplas aplicações tecnológicas, que são pertinentemente relacionadas e apresentadas no (Quadro 8a e 8b) a seguir.

**Quadro 8a-** Aplicações do Grafeno

| <b>Qualidades</b>              | <b>Aplicações Tecnológicas</b>  | <b>Impacto</b>  |
|--------------------------------|---|---|
| Espessura Atômica              | Aparelhos e componentes finos e flexíveis   | Novos dispositivos.   |
| Dobrável em Escala Nanométrica | Engenharia de novos materiais a partir da manipulação e empilhamento de diferentes planos atômicos  |   |
| Material de Superfície         | Controle fino da química de superfície. Engenharia de novos recobrimentos e filmes finos. Plataforma para novos sensores químicos e biológicos. | Concepção de materiais inteiramente novos, cujas propriedades podem ser customizadas para novas aplicações. |
| Processável em Solução         | Novos materiais compósitos com excelentes propriedades. Novos materiais funcionais  |   |

**Fonte:** Adaptado de Bellucci, Vasquez, Conti (2021)

**Quadro 8b - Aplicações do Grafeno**

| <b>Qualidades</b>  | <b>Aplicações Tecnológicas</b>  | <b>Impacto</b>  |
|--|---|---|
| Mobilidade de elétrons                                   | Eletrônica de alta frequência.  | Novos dispositivos de alta performance a baixo custo, permitindo avanços em setores de grande impacto social (monitoramento ambiental, saúde, comunicação, entre outros). |
| Absorção Ótica e Efeito Fotoelétrico                     | Novos dispositivos óptico-eletrônicos e termoeletrônicos. Fotodetectores. |   |
| Sensibilidade ao Efeito de Campo                         | Transdutores de alta sensibilidade.                                       |   |
| Alta Capacitância; Alta Área Específica                  | Excelentes supercapacitores.  | Avanços significativos para a introdução de dispositivos sustentáveis e sistemas de energias limpas.  |
| Efeito Voltaico e Fotocatalítico; Transparência; Efeitos | Conversão de energia, captura de energia, dispositivos autoalimentados.   |   |
| Supercondutividade Quiral                                | Supercondutores de alta temperatura.                                      |   |
| Férmion de Dirac; Pseudospin                             | Eletrônica e capacidade computacional além de limites conhecidos.         | Novos dispositivos baseados em campos ainda inexplorados da física experimental.  |

**Fonte:** Adaptado de Bellucci, Vasquez, Conti (2021)

O grafeno pode ser adicionado ao plástico, resultando em um aumento significativo de sua resistência. Quando combinado com conscientização e políticas sociais, esse aumento pode reduzir a necessidade de produção constante, incentivando a reutilização dos produtos, evitando descarte precoce e diminuindo a geração de resíduos no meio ambiente.

A adição de nano cargas gráficas à matriz polimérica oferece a oportunidade de aprimorar poliolefinas como o PEAD. Geralmente, pequenas quantidades de grafeno são suficientes para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas da matriz polimérica, tornando-a adequada para aplicações de engenharia avançada (TRIPATHI, 2017).

Outra característica que torna a adição de grafeno ao PEAD uma opção adequada para a fabricação de telhas ou placas solares é sua resistência a altas temperaturas. O grafeno apresenta alta condutividade térmica e mantém desempenho superior em condições extremas de calor, tornando essas telhas uma solução eficiente e durável para projetos de energia solar.

O Quadro 9, apresentam aplicações promissoras, de uso do Grafeno em células solares ou em sistemas fotovoltaicos.

**Quadro 9 – Aplicações e Utilidades do Grafeno**

| <b>Aplicação</b>  | <b>Utilidade</b>   |
|---|--|
| Películas condutoras Transparentes                                | Grafeno usado como filme condutor transparente, pode substituir materiais como óxidos de estanho e prata, com alta transparência e boa condutividade                                     |
| Camadas de interface / eletrodos de grafeno em células Si-grafeno | Grafeno usado como camada de interface, otimização de carga e transporte de elétrons, redução de resistência de série, melhoria de “fill factor”   |
| Fotovoltaica de perovskita, orgânica ou sensibilizada             | Em células de perovskita ou orgânicas, grafeno é usado para melhorar estabilidade, transporte de elétrons / buracos, como aditivo em camadas ativas ou como camadas de proteção          |
| Gestão térmica e refrigeração de painéis                          | Grafeno ou derivados usados em materiais de interface térmica ou nanofluidos para dissipar calor, melhorando a eficiência sob calor, reduzindo queda de performance por temperatura alta |

**Fonte:** Autor, (2025)

A obtenção do grafeno está diretamente vinculada à mineração de grafite, que no Brasil apresenta contradições socioambientais significativas. O país se destaca como um dos grandes detentores dessa matéria-prima, mas ainda exporta majoritariamente grafite em estado bruto, sem agregação de valor (Click Petróleo e Gás, 2024). Além disso, os impactos da atividade incluem desmatamento, degradação do solo, poluição hídrica e riscos para comunidades próximas (MONGABAY, 2025).

Estudos recentes apontam para a existência de minas abandonadas ou mal geridas, ampliando os riscos de contaminação persistente em diferentes territórios (Reuters, 2025). Nesse sentido, a mineração de grafite, embora estratégica para a transição energética, enfrenta críticas quanto à sua real sustentabilidade.

Outro ponto em debate é a chamada geração de “energia limpa”. Pesquisas em Análise de Ciclo de Vida (LCA) mostram que toda a cadeia de produção e descarte de dispositivos

fotovoltaicos envolve emissões de carbono incorporado e uso de insumos críticos, frequentemente extraídos com impactos significativos (ACS OMEGA, 2023).

Questões sociais, como conflitos em áreas de mineração e impactos sobre comunidades indígenas e tradicionais, reforçam que a transição energética, se não pautada por critérios de justiça ambiental, pode reproduzir desigualdades (ROCHA; SEABRA; SANTOS, 2025).

Portanto, embora o grafeno tenha potencial para ampliar a eficiência tecnológica, sua aplicação no campo da energia solar precisa ser analisada criticamente, considerando as limitações e controvérsias que relativizam o mito de uma energia totalmente “verde” ou “limpa”.

O Quadro 10 a seguir resume as principais controvérsias relacionadas ao uso do grafeno, sob a perspectiva ambiental e da pegada de carbono.

**Quadro 10** – Controvérsias e Impactos presentes do Grafeno

|                                      | <b>Controvérsia</b>   | <b>Impacto</b>   |
|--------------------------------------|---|--|
| <b>Origem da matéria-prima</b>       | Produzido a partir do grafite natural (extraído de minas, principalmente na China, Índia e Brasil).   | A mineração do grafite envolve impactos ambientais: desmatamento, uso intensivo de água, geração de resíduos e emissão de poeiras tóxicas.                                   |
| <b>Pegada de carbono na produção</b> | Métodos industriais como esfoliação química, deposição química de vapor (CVD) e redução de óxidos de grafeno podem consumir muita energia, dependendo da escala e da fonte energética | Processos de síntese podem liberar subprodutos químicos e gases de efeito estufa, aumentando a pegada de carbono.  |
| <b>Toxicidade e resíduos</b>         |   | Discussões sobre os efeitos ecotoxicológicos de nanopartículas de grafeno descartadas em água ou solo. Pesquisas ainda investigam os riscos para ecossistemas e saúde humana |
| <b>Sustentabilidade x Impacto</b>    | O grafeno pode ser aplicado em energias renováveis, baterias, painéis solares e materiais reciclados (como no seu caso, telhas de PEAD com grafeno), trazendo ganhos sustentáveis.    | Porém, se a cadeia de produção não for limpa, a pegada ambiental contradiz o discurso de “material verde”.   |

**Fonte:** Autor, (2025)

O grafeno apresenta grande potencial para aplicações sustentáveis, mas existem controvérsias relacionadas à origem da matéria-prima, aos processos de fabricação e à pegada de

carbono associada. Esse debate é semelhante ao observado em outros materiais de alta tecnologia, como o lítio e o cobalto utilizados em baterias

## 2.15 Caracterização da Telha de PEAD Reciclado com Grafeno

A definição da quantidade de materiais constituintes da telha de PEAD reciclado com grafeno é fundamental para compreender suas propriedades técnicas, econômicas e ambientais. A proporção entre o polímero reciclado e o grafeno determina não apenas o desempenho mecânico e energético do artefato, mas também influencia diretamente o custo de produção, a viabilidade de escalabilidade industrial e o potencial de sustentabilidade.

Estudos recentes demonstram que a incorporação de pequenas frações de grafeno em matrizes poliméricas, como o polietileno de alta densidade (PEAD), pode melhorar significativamente propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, mantendo baixo impacto em termos de custo de produção (ASLANI et al., 2019; HOSSAIN, 2020).

Nesse sentido, estimar a massa de PEAD necessária para a fabricação de uma unidade de telha, assim como a fração de grafeno incorporada, permite avaliar com maior precisão as vantagens desse artefato em comparação a alternativas convencionais, como os painéis solares tradicionais.

Além disso, a análise da composição material se conecta ao enfoque da inovação frugal, evidenciando como o uso eficiente de insumos reciclados, aliado à adição mínima de um insumo de alto valor agregado, possibilita a criação de soluções acessíveis, sustentáveis e coerentes com os princípios da tecnociência solidária.

A seguir, apresenta-se uma estimativa da massa de PEAD utilizada em telhas de PEAD reciclado com espessuras variando de 2 a 5 mm.

Govindaraj (2021), afirma que melhorias significativas em propriedades mecânicas e térmicas costumam ocorrer com cargas muito baixas (tipicamente entre ~0,01% e 2% em peso), e cargas ótimas frequentemente relatadas em 0,1–1% ou até 1–2%.

Ao utilizar uma telha de dimensões, 1,10 m (largura) × 1,90 m (comprimento) e área de 2,09m<sup>2</sup>, pode ser adotado uma densidade de 950 Kg/m<sup>3</sup>(WONG *et. al.* 2018).

Assim, Segundo Wong *et. al.* (2018), a utilização de cargas de Grafeno em matrizes poliméricas superiores a 2%, geram prepressas relativos a aglomeração de material e custos.

A Tabela 1, apresenta estimativa de massa de PEAD, utilizada em telhas de PEAD reciclado para espessuras de 2 a 5 mm.

**Tabela 1 – Estimativa de Massa de PEAD**

| Espessura (mm) | Massa aproximada (kg) |
|----------------|-----------------------|
| 2,0 mm         | 3,97 kg               |
| 3,0 mm         | 5,96 kg               |
| 4,0 mm         | 7,94 kg               |
| 5,0 mm         | 9,93 Kg               |

**Fonte:** Autor, (2025)

A Tabela 2, propõe a estimativa de quantidade de Grafeno por espessura de Telha:

**Tabela 2 – Estimativa em Massa de Grafeno**

| Espessura (mm) | 0,1% g | 2% g    |
|----------------|--------|---------|
| 2,0 mm         | 3,97g  | 79,42g  |
| 3,0 mm         | 5,96g  | 119,12g |
| 4,0 mm         | 7,97g  | 158,84g |
| 5,0 mm         | 9,93g  | 198,54g |

**Fonte:** Autor, (2025)

## 2.16 Controvérsias sobre os Painéis Solares

A difusão dos painéis solares como artefatos tecnológicos carrega consigo um forte apelo social, econômico e ambiental, pois representam um instrumento de geração de energia elétrica

renovável, com potencial de transformação no sentido da democratização do acesso à energia e da mitigação dos impactos ambientais associados às fontes fósseis.

Entretanto, ao problematizar esse objeto técnico, percebe-se que sua materialidade e sua trajetória de produção e circulação extrapolam a narrativa de neutralidade e sustentabilidade frequentemente atribuída a tais dispositivos.

Inspirando-se na perspectiva de Latour (2012), os painéis solares não devem ser entendidos apenas como ferramentas ou pano de fundo em que atores sociais humanos desempenham como papel principal. Eles constituem, na verdade, elementos de uma rede sociotécnica em que humanos e não humanos compartilham agência, valores e controvérsias.

Nesse contexto, a produção dos módulos fotovoltaicos depende de intensivos processos industriais que envolvem elevado consumo de energia, uso de água e incorporação de matérias-primas diversas, como metais, plásticos e vidro, o que gera impactos socioambientais significativos (ANSELMO, 2019).

Essa constatação é reforçada por Fthenakis (2018), ao analisar o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos e evidenciar os impactos ambientais distribuídos entre as fases de fabricação, operação e descarte.

Do ponto de vista da toxicidade, Mulvaney (2019) alerta que a produção envolve substâncias químicas perigosas e processos de manufatura que geram passivos ambientais. Contudo, tal leitura é tensionada por Souza (2021), que enfatiza o papel estratégico da energia solar fotovoltaica na promoção da sustentabilidade global, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando emissões de gases de efeito estufa.

Esse contraste evidencia a coexistência de narrativas opostas, que oscilam entre o reconhecimento dos benefícios ambientais e a problematização de seus custos sociais e ecológicos. Segundo, Ghizoni (2016), outro aspecto problemático refere-se ao destino dos módulos após o término de sua vida útil. Embora a reciclagem possa reinserir resíduos na cadeia produtiva, contribuindo para redução de custos e evitando a exploração de novas fontes naturais

A expansão acelerada da energia solar pressiona a emergência de um desafio de grandes proporções: o descarte de milhões de toneladas de painéis nos próximos anos. Essa problemática projeta-se no futuro próximo como um dilema central para a sustentabilidade do setor.

Além disso, há impactos indiretos associados à extração de matérias-primas estratégicas. O silício e a prata, por exemplo, são recursos finitos, cuja exploração intensiva levanta dúvidas sobre a sustentabilidade a longo prazo (ANSELMO, 2019).

Geller (2004) também chama atenção para os efeitos negativos distribuídos ao longo de toda a cadeia: desde emissões tóxicas e gases poluentes (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulados) até a ocupação de áreas naturais, com risco de perda de habitats. Nesse sentido, ainda que a instalação em telhados e áreas urbanas reduza impactos territoriais, a expansão em formato de “fazendas solares” apresenta controvérsias adicionais.

A própria denominação “fazendas solares” problematiza o imaginário associado a esses empreendimentos. Se no dicionário Michaelis (2023) “fazenda” é definida como grande propriedade rural destinada à lavoura ou criação de gado, no setor energético essa expressão foi ressignificada para designar usinas centralizadas de energia solar, instaladas em grandes áreas (AMARAL; OLIVEIRA, 2021).

Esse modelo, embora eficiente em termos de geração, pode provocar alterações no meio biótico, perda de habitat e conflitos no uso da terra, sobretudo em ecossistemas sensíveis. Essa configuração, tem recebido críticas devido à transformação do uso do solo, à supressão de vegetação e aos riscos para a fauna local, como apontam (MULVANEY, 2019; SCOTT, SMITH 2017).

No plano socioeconômico, a energia solar é frequentemente apresentada como instrumento de inclusão social, gerando empregos e contribuindo para redução de desigualdades (Renzi, 2020). Contudo, tal promessa é tensionada por evidências de que, em sua implementação atual, os maiores benefícios recaem sobre as classes mais altas, capazes de arcar com os custos iniciais de instalação (SOVACOOOL, 2021).

Essa desigualdade reforça o caráter problemático da tecnologia: ao mesmo tempo que carrega o potencial de democratização, também pode reproduzir barreiras estruturais de acesso.

Do ponto de vista social, a energia solar apresenta também contradições. Se, por um lado, pode gerar empregos e estimular a economia (Renzi, 2020), por outro, tende a beneficiar desproporcionalmente camadas sociais mais altas, dado o elevado investimento inicial exigido para sua implementação. Nesse sentido, corre-se o risco de perpetuar desigualdades, afastando a

tecnologia das populações que mais necessitam de acesso a energia limpa e acessível (JACOBSON et al., 2015).

Sob essa perspectiva, a energia solar deve ser compreendida como um campo de disputas e controvérsias sociotécnicas. A definição clássica de sustentabilidade, presente no Relatório Brundtland (1987), orienta que atividades humanas respeitem os limites ambientais e promovam o uso racional dos recursos. Contudo, a prática revela que a materialidade dos painéis envolve dilemas quanto ao ciclo de vida, ao uso intensivo de recursos, à toxicidade de seus componentes e à distribuição desigual de seus benefícios.

Latour (2012) lembra que tecnologias não são neutras, mas carregam valores e interesses que moldam a sociedade. Dessa forma, problematizar os painéis solares significa reconhecer que sua contribuição para a transição energética dependerá de escolhas políticas, sociais e tecnológicas orientadas pela ética e pela justiça ambiental.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Materiais e Método**

Para a realização deste estudo, foram utilizados como materiais o PEAD (Polietileno de Alta Densidade), grafeno e um painel solar de 150 W, de silício policristalino. Além disso, foi realizada uma pesquisa teórica sobre Tecnociência, Inovação Frugal, Seleção de Materiais e conceitos de Desenvolvimento e Sustentabilidade. O desenvolvimento da tese baseou-se na Metodologia DSR (Design Science Research) para a geração de alternativas e validação, conforme classificado na Figura 21.

Inicialmente, foi realizado um levantamento exploratório de teorias e ideias sobre Inovação Frugal, Tecnologia Social e Tecnociência, com o objetivo de determinar se o artefato satisfazia os objetivos da pesquisa. Em seguida, com base nos conceitos levantados, aplicou-se a metodologia DSR adaptada de Dresch (2020), conforme detalhado na Tabela 7, para a análise do artefato estudado.

A partir das características dos artefatos apresentadas na tabela comparativa (Tabela 10), foram realizados cálculos para avaliar a eficiência energética dos artefatos e sua equivalência. Posteriormente, foram identificados os pontos críticos da Tecnociência, com base nas críticas de

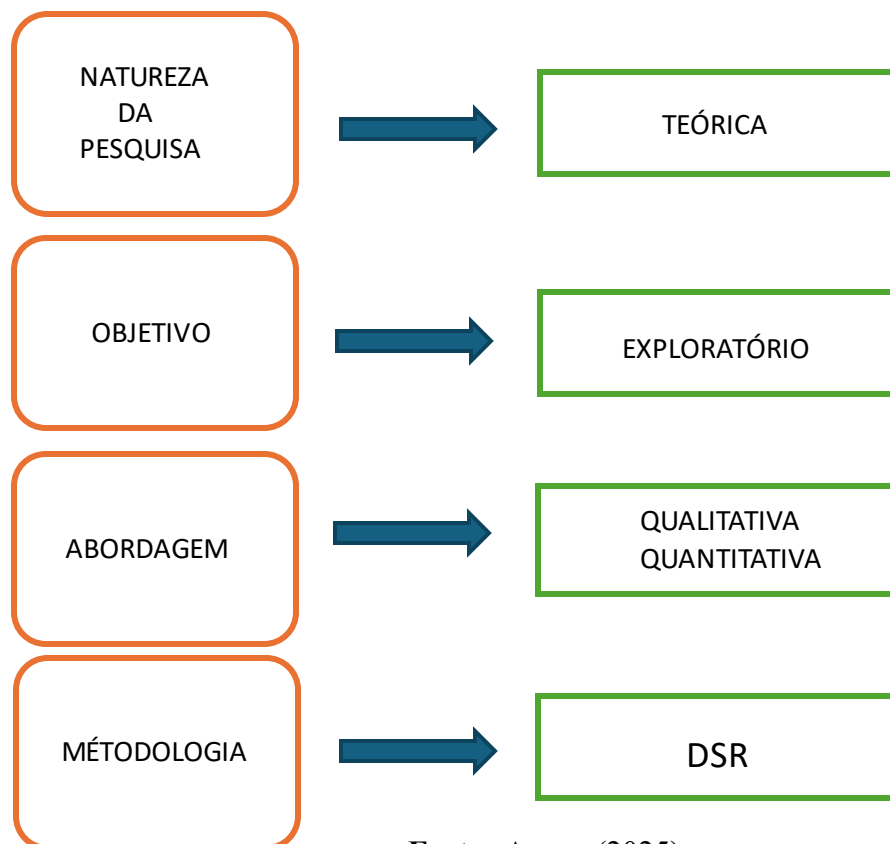
Dagnino (2007), e confrontados com as características da Inovação Frugal, a fim de demonstrar o potencial desta abordagem frente às limitações da Tecnociência.

Para corroborar a ideia de artefato de Inovação Frugal, realizou-se um confronto entre o artefato telha e os princípios da Tecnociência Solidária, conforme proposto por Dagnino. Os resultados, apresentados no Quadro 12, confirmam a capacidade de inovação frugal das telhas, evidenciando características de inclusão, sustentabilidade e inovação tecnológica.

Por fim, foi analisado o comportamento do artefato sob a perspectiva de Tecnologia Social, destacando como as telhas de PEAD reciclado com grafeno contribuem para a valorização econômica, social e ambiental. Os resultados dessa análise foram discutidos de forma integrada ao longo do estudo.

A classificação da pesquisa utilizada no trabalho é de natureza aplicada, objetivo exploratório, abordagens qualitativa e quantitativa e o método DSR – Design Science Research – adotado, Figura 21.

**Figura 21** - Classificação da Pesquisa, adota no trabalho.



**Fonte:** Autor, (2025)

Dessa forma, a pesquisa se insere no âmbito de estudos de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa e caráter interdisciplinar exploratório, visando compreender o potencial das telhas de PEAD reciclado com grafeno como artefato de Inovação Frugal, alinhado à Tecnociência Solidária.

O objetivo central é analisar, de forma comparativa, as telhas de PEAD reciclado com grafeno em relação aos painéis solares, considerando aspectos de eficiência energética, custo, durabilidade e impacto social e ambiental.

O estudo combina análise quantitativa, por meio da comparação de custo, produção de energia e vida útil dos artefatos, e análise qualitativa, com base em referências teóricas críticas à Tecnociência e à Inovação Frugal, conforme discutido por autores como Dagnino, Radjou e Weyrauch & Herstatt.

A metodologia adotada foi o Design Science Research (DSR), utilizada para avaliar os artefatos dentro de um contexto social, considerando aspectos econômicos, sustentáveis e de inclusão social. Os cálculos mensuraram a eficiência energética dos artefatos, enquanto a análise interpretativa foi conduzida com base em referenciais de Tecnociência, Desenvolvimento Sustentável e Tecnologias Sociais.

### **3.2 Metodologia de pesquisa - *Design Science Research* (DSR)**

A pesquisa foi realizada por meio de uma abordagem qualitativa e quantitativa de objetivo exploratório, para verificar o potencial de Inovação Frugal das Telhas de PEAD reciclado com grafeno frente aos Painéis Solares, apresentando controvérsias existentes nos artefatos, e por meio de uma revisão literária de conceitos e definições, relacionando, características e definições de Inovação Frugal com as definições ou críticas a Tecnociência, abordada por autores, e realizando uma comparação de eficiência energética.

Neste momento passo a definir a metodologia, utilizada na pesquisa, o Design Science Research (DSR): Segundo Simon (1996), a Design Science envolve um paradigma pragmático de pesquisa que busca criar, ou prescrever artefatos inovadores, para resolver problemas do mundo real. O DSR inclui o foco no artefato, além de dar prioridade à relevância de sua aplicação.

Dois fatores são fundamentais para conduzir a pesquisa DSR com sucesso: o rigor, fundamenta para contribuir para o aumento da base de conhecimento em determinada área e ser considerada válida e confiável; e a relevância, pois para os profissionais contemplados é primordial fazer uso do resultado das investigações e do conhecimento gerado para solucionar problemas práticos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

Segundo Dresch, Lacerda e Antunes (2020), Design Science Research (DSR) “é o método que fundamenta e operacionaliza a condução da pesquisa quando o objetivo a ser alcançado em um artefato ou uma prescrição.”

No Quadro 11, apresentado foi a comparação entre a Metodologia DSR e a aplicação em um artefato, como exemplo, afim de demonstrar as diretrizes para a realização de pesquisa de forma geral, utilizando o DSR, em artefatos, Dresch(2020).

**Quadro 11** - Comparativo de Pesquisa de Artefatos usando o Método *Design Science Research (DSR)*

| <b>Etapa DSR (Dresch)</b>                    | <b>Descrição da Etapa</b>  | <b>Aplicação à Pesquisa de Artefatos</b>  | <b>Exemplo Prático de Artefato</b>  |
|--|--|---|---|
| <b>1. Identificação do Problema</b>          | Definir claramente o problema ou desafio que precisa ser resolvido ou melhorado.       | Identificar uma necessidade ou lacuna tecnológica em artefatos existentes.                        | Identificar a baixa eficiência energética em baterias de carros elétricos.              |
| <b>2. Definição dos Objetivos da Solução</b> | Estabelecer objetivos claros para solucionar o problema identificado.                  | Descrever os objetivos que o artefato deve alcançar   | Melhorar a autonomia da bateria em 30% sem aumentar o peso do veículo.                  |
| <b>3. Desenvolvimento do Artefato</b>        | Criar, projetar ou desenvolver um artefato que atenda aos objetivos propostos.         | Desenvolvimento ou proposta de novo design de artefato  | Criação de uma nova composição química para baterias de lítio.                          |
| <b>4. Avaliação do Artefato</b>              | Testar e avaliar o artefato em termos de desempenho, eficiência e adequação à solução. | Aplicar métodos quantitativos e qualitativos para testar o artefato no contexto real ou simulado. | Testes de laboratório e de campo para verificar a durabilidade e desempenho da bateria. |
| <b>5. Comunicação dos Resultados</b>         | Relatar os resultados da pesquisa, incluindo o sucesso ou fracasso do artefato.        | Apresentar os resultados em artigos acadêmicos, relatórios ou conferências.                       | Publicar os resultados da bateria em uma revista científica de tecnologia.              |
| <b>6. Refinamento Contínuo</b>               | Com base na avaliação, melhorar o artefato em ciclos iterativos de desenvolvimento.    | Refinar o design e os processos do artefato, baseando-se em feedback e testes.                    | Melhorar a resistência da bateria a diferentes condições climáticas.                    |

Fonte: Dresch et. al. (2020)

O método Design Science Research ajuda a estruturar o processo de desenvolvimento de artefatos de forma rigorosa e prática, equilibrando as demandas acadêmicas e industriais. Isso faz com que o DSR seja uma ferramenta robusta para inovação tecnológica.

A característica fundamental da pesquisa que usa a DSR, é a sua orientação à solução de problemas específicos, nem sempre procurando uma solução ótima, mas a solução satisfatória, que satisfaça a situação-problema (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

Como objeto de desenvolvimento, não se está referindo única e exclusivamente ao desenvolvimento de produtos, pois, Design Science Research (DSR) pode servir para este fim, mas tem um objetivo mais amplo: gerar conhecimento que seja aplicável e útil para a solução de problemas, melhoria de sistemas já existentes e, ainda, criação de novas soluções e/ou artefatos.

A Metodologia DSR pode sustentar o desenvolvimento e a construção de artefatos a partir das necessidades observadas, bem como dos problemas que interessam ao investigador, contribuindo para fortalecer a base de conhecimento, fornecendo os ambientes ideais para os testes de novas teorias e o desenvolvimento de novos artefatos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

Portanto, a seguir, apresento um quadro de pesquisa comparativa de artefatos, usando o método Design Science Research (DSR) com base nas etapas propostas por Aline Dresch, aplicado no artefato de estudo.

**Quadro 12-** Aplicação do DSR no artefato de estudo intitulado Análise da Capacidade de Inovação Frugal das Telhas de PEAD reciclado com Grafeno e Painéis Solares sob a Ótica da Tecnociência.

| <b>Etapa</b>                              | <b>Descrição</b>   |
|---|--|
| <b>Identificação do Problema</b>          | Verificar se as telhas de PEAD reciclado com Grafeno, se tratam de um artefato de Inovação frugal de características Tecnocientíficas, pois, podem durar 80 anos enquanto telhas convencionais e painéis solares duram de 25 a 30 anos, e podem gerar energia. |
| <b>Definição dos Objetivos da Solução</b> | Para o estudo foi realizada uma pesquisa bibliográfica, de objetivo exploratório e abordagens qualitativa e quantitativa.  |
| <b>Prescrever um artefato</b>             | Prescrição do artefato foi desenvolvido a partir da modelagem estatística da eficiência energética comparativa das telhas de PEAD e os Painéis solares, sob a ótica da Tecnociência.   |
| <b>Avaliação do Artefato</b>              | O artefato foi avaliado, de forma comparativa em relação as suas eficiências energéticas, custo, e capacidade de geração de energia.   |
| <b>Comunicação dos Resultados</b>         | A socialização e a comunicação científica do trabalho, foi realizado por meio de publicações e participações em eventos Tecnocientíficos da área Interdisciplinar- CAPES.  |
| <b>Refinamento Contínuo</b>               | Com base nas avaliações realizadas será possível fazer uma projeção de resultados, a basear na consolidação dos impactos econômicos sociais e ambientais.  |

**Fonte:** Adaptado Dresch (2020)

Segundo Dresch (2020), artefato, é qualquer criação humana que não tenha sido contemplada pela origem na natureza, ou seja, é um produto do conhecimento e da técnica humana.

A seguir é apresentada uma análise comparativa energética e econômica dos artefatos, em comparação, fazendo uso de suas características, a fim de se obter a energia necessária para suprir o consumo de 30KWh/ mês.

### 3.3 Análise Comparativa de Desempenho Energético e Econômico

Foi realizada a comparação, entre as características de uma telha de PEAD reciclada com Grafeno Fig.22, e um Painel Solar de 150w Fig.23, que foram analisados em relação à sua eficiência energética. As capacidades de geração de energia diária e mensal foram calculadas e aplicadas a uma faixa de consumo de energia de 30KWh/mês, que pode ser extrapolada para consumos superiores.

**Figura 22** - Telhas de PEAD com Grafeno



Fonte: Telite® (2022)

**Figura 23** - Painel Solar



Fonte: Autor, (2025)

A presente seção apresenta uma análise comparativa entre a capacidade de geração de energia das telhas de PEAD reciclado com grafeno, e os painéis solares fotovoltaicos convencionais, que podem ser: monocristalinos e policristalinos.

Monocristalinos, são fabricados em silício, em um único cristal, altamente puro, tem uma estrutura organizada e com eficiência entre 15 a 22%.

Policristalino, são fabricados com fragmentos de silício fundido, tem estrutura irregular com mais defeitos, e o processo de fabricação é mais simples, e com eficiência entre 13 a 18%, tendo um custo menor que o anterior, sendo mais acessível (GREENMATCH, 2022)

Na análise, é utilizado o painel solar policristalino, da marca Resun RS6E- 150p de 150 w. O objetivo é verificar a viabilidade técnica e econômica das telhas como uma inovação frugal e

sustentável, considerando não apenas a produção energética, mas também fatores de custo, estrutura e impacto ambiental.

Para o cálculo foram utilizadas as fórmulas 1 e 2, de posse das características dos artefatos, presentes na tabela 3, foram analisados 2 cenários, o primeiro conservador, onde foi utilizada uma radiação solar (Peak sun) de 4,5h/dia, e o segundo cenário otimista com (Peak sun), de 5h/dia de radiação solar.

A Tabela 3 a seguir apresenta as características dos artefatos utilizados no estudo:

**Tabela 3** - Características da telha e do painel solar utilizado

| <b>Elemento de Construção</b> | <b>Telhas de PEAD com Grafeno</b> | <b>Painel Solar<br/>RESUN RS6E-150P (150 W)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| <b>Peso</b>                   | 7kg                               | 11,5kg  |
| <b>Medidas</b>                | 1,10 x 1.90 m                     | 1,49 x 0,66 m                                   |
| <b>Geração de Energia</b>     | 30 KWh/mês                        | 15.18KWh/mês                                    |
| <b>Tempo de Garantia</b>      | 80 anos                           | 30 anos   |
| <b>Custo</b>                  | R\$ 147,30 reais                  | R\$ 279,45 reais                                |

Fonte: Autor, (2025)

Com base nas características dos artefatos foram calculadas as eficiências energéticas, para a faixa consumo de 30KWh/mês, consumo este que satisfaz o consumidor beneficiado pela Tarifa Social.

**Para o cálculo e comparação foram considerados:**

- Radiação média útil (Peak sun) – em cenário conservador de: 4,5h/dia
- Radiação média útil (Peak sun) – em cenário otimista de: 5,0h/dia
- Fator de desempenho do sistema (perdas)= 0,75 a 1(sem perda)

**Observação:** As perdas de 25%, foram consideradas no cenário conservador, causadas por inversor, cabeamento, sujeira e temperatura.

**Foram utilizadas as equações 1 e 2 para os cálculos de energia:**

**Equação 1**

$$\text{Energia (kWh/dia)} = \frac{\text{Potência (W)} \times \text{Peak sun (h/dia)} \times \text{Fator de desempenho}}{1000}$$

**Equação 2**

$$\text{Energia (KWh/dia)} \times 30 \text{ dias} = \text{Energia (WKh/mês)}$$

### 1) Cenário Conservador

#### **Painel Solar Policristalino150p – (150w)**

1a) Energia Gerada por dia –  $150 \times 4,5 \times 0,75/1000 = 0,50625\text{KWh/dia}$

1b) Energia Gerada por mês –  $30 \times 0,50625 = 15,1875\text{KWh/mês}$

### 2) Cenário Otimista

#### **Painel Solar Policristalino150p – (150w)**

2a) Energia Gerada por dia –  $150 \times 5,0 \times 1/1000 = 0,75\text{KWh/dia}$

2b) Energia Gerada por mês –  $0,75 \times 30 = 22,5\text{KWh/mês}$

#### **Telha de PEAD reciclado com Grafeno:**

**Energia Gerada por mês – 30KWh/mês**

- Os resultados são apresentados na seção 4.

A seguir, no (Capítulo 3.4), foi apresentado no (Quadro 13), a capacidade de resposta da Inovação Frugal, as críticas a Tecnociencia segundo Dagnino, e no (Quadro 14), o caráter solidário presente nas Telhas de PEAD reciclado com grafeno.

O objetivo foi demonstrar a capacidade de resposta as críticas a Tecnociencia, por parte da Inovação frugal e reafirmar as telhas como um artefato de tecnologia social, de objetivo solidário.

## **3.4 Relação entre Inovação Frugal, Tecnociência e seu objetivo solidário**

A crítica de Dagnino à tecnociência, destaca como o conhecimento científico se tornou uma ferramenta do capital, reproduzindo desigualdades e excluindo populações periféricas. Nesse contexto, a inovação frugal aparece como alternativa, ao propor soluções simples, acessíveis e sustentáveis, com foco nas necessidades reais e contextos locais.

Um exemplo são as telhas solares de grafeno, que ao utilizarem materiais recicláveis e tecnologia acessível, podem democratizar o acesso à energia, e promover desenvolvimento social com baixo custo. Como afirmam Radjou et al. (2014), “a inovação frugal entrega mais valor com menos recursos”, desafiando o paradigma tecnocientífico dominante, e colocando em pauta uma Tecnociencia Solidária.

No quadro 13 a seguir, é apresentada uma discussão entre os pontos críticos, sobre a Tecnociência, apontados por Dagnino, e correlaciona, Tecnociência e Inovação Frugal, afim de corroborar a capacidade de resposta da Inovação Frugal as críticas a Tecnociência Tradicional.

**Quadro 13 - Relação entre Inovação Frugal e Tecnociência**

| <b>Pontos Críticos</b>                     | <b>Tecnociência</b>   | <b>Inovação Frugal</b>  |
|--|---|---|
| Caráter Sistemático                        | Tecnociência é parte de um sistema que integra C&T com interesses econômicos e políticos, favorecendo grandes corporações e os países centrais.                     | A inovação frugal, busca alternativas mais acessíveis, com menor custo, focando em soluções mais simples, e que atendam às necessidades da população excluída   |
| Orientação no Mercado                      | Tecnociência tradicional é orientada pelo mercado, e as inovações visam gerar lucro e atender às demandas de consumo da elite                                       | Inovação Frugal priorizar necessidades básicas de populações de baixa renda, buscando soluções que não se orientam exclusivamente pelo lucro, mas pela funcionalidade e acessibilidade.               |
| Desigualdade na distribuição de benefícios | A Tecnociência tende a concentrar os benefícios em setores privilegiados da sociedade, enquanto a maior parte da população não usufrui dos avanços tecnológicos     | A inovação frugal visa reduzir essa desigualdade, ao propor soluções que possam ser acessíveis e benéficas para as populações marginalizadas.   |
| Controle de Conhecimento                   | O conhecimento tecnocientífico é controlado por elites, seja em universidades, empresas, o que limita o acesso democrático à informação e tecnologia.               | A inovação frugal busca democratizar o conhecimento, utilizando materiais e tecnologias que estão amplamente disponíveis, promovendo um tipo de inovação que pode ser replicada e adaptada localmente |
| Impacto Ambiental                          | A Tecnociência tradicional muitas vezes contribui para o esgotamento de recursos naturais e degradação ambiental.   | A inovação frugal geralmente adota práticas sustentáveis, utilizando menos recursos e reaproveitando materiais, o que a torna mais amigável ao meio ambiente  |
| Inovação fora de contexto                  | Inovações tecnocientíficas, muitas vezes, estão fora de contexto para as necessidades locais, sendo importadas de outros países sem adaptação cultural ou regional. | Inovação frugal valoriza a adaptação local, criando soluções que se ajustam ao contexto sociocultural e econômico das comunidades em que são implementadas  |
| Prioridade de Pesquisas de Alta Tecnologia | Foco da Tecnociência tende a ser a alta tecnologia, que exige grandes investimentos e geralmente não respeitam as necessidades imediatas da maioria da população    | Inovação frugal privilegia tecnologias simples e acessíveis, que pode ser aplicadas com recursos limitados e que atenda diretamente as necessidades cotidianas  |
| Dependência Tecnológica                    | Tecnociência pode gerar uma dependência tecnológica em relação a países desenvolvidos, perpetuando a subordinação de países periféricos                             | Inovação frugal fortalece a independência tecnológica, ao incentivar a criação de soluções locais com recursos disponíveis internamente, reduzindo a dependência de tecnologias importadas            |
| Alienação e Exclusão Social                | O modelo tecnocientífico vigente pode alienar parte da população, que não compreende ou não se beneficia dos avanços tecnológicos                                   | A inovação frugal, ao buscar por soluções inclusivas e acessíveis, procura diminuir essa alienação, criando produtos e serviços que são compreensíveis e úteis para todos                             |

**Fonte:** Dagnino (2008)

Segundo Dagnino (2004), a Tecnociência solidária visa desenvolver soluções tecnológicas que promovam inclusão social e sustentabilidade, priorizando a democratização do conhecimento e o benefício coletivo.

A Tecnociência Solidária é capaz de fornecer um arcabouço teórico e político, para orientar a aplicação do conhecimento, para resolver problemas coletivos, de forma democrática, coletiva e direcionada às necessidades sociais. (DAGNINO, 2020)

Portanto, como mostrado no quadro acima a Inovação Frugal é capaz de responder aos pontos críticos apresentados, por Dagnino sobre a Tecnociência, pois, oferece um paradigma metodológico, para se desenvolver tecnologias de baixo custo, de forma apropriada, com redução de custos, visando atender populações de baixa renda com soluções utilitárias e sustentáveis. (BASU et al., 2021)

E o artefato, de estudo, vem de forma controversa ao apelo, firmado nos pontos críticos a, Tecnociência para reafirmar que o artefato é capaz de se firmar como uma Inovação Frugal, como exposto no quadro acima, pois, responde aos apelos de sustentabilidade, desenvolvimento, inclusão social com redução de custo, pilares presentes em uma Inovação Frugal, segundo autores.

No Quadro 14, apresenta-se a comparação das telhas, geradoras de energia, se alinham a perspectiva, e vem corroborar com o já citado anteriormente, e exposto, o conceito de Tecnociência defendida por Dagnino (2004), que propõe uma abordagem tecnológica, voltada para a inclusão social, sustentabilidade, de promoção do bem comum e não somente visando o lucro de grandes empresas.

**Quadro 14 - Comparação entre as Telhas e a Tecnociência Solidária**

| <b>Critério</b>           | <b>Telhas Geradoras de Energia</b>   | <b>Tecnociência Solidária</b>                                      |
|---------------------------|--|--|
| <b>Acessibilidade</b>     | Reduzem custos a longo prazo e tornam energia renovável mais viável para diversas camadas sociais. | Democratização do acesso à tecnologia.                             |
| <b>Autossuficiência</b>   | Possibilitam maior independência energética para residências e comunidades.                        | Fortalecimento de economias locais e descentralização energética.  |
| <b>Sustentabilidade</b>   | Integram geração de energia à estrutura da casa, reduzindo impactos ambientais.                    | Tecnologia desenvolvida com enfoque ambiental e social.            |
| <b>Inovação Inclusiva</b> | Alternativa para regiões sem infraestrutura elétrica consolidada.                                  | Desenvolvimento de tecnologias apropriadas às necessidades locais. |

Fonte: Autor, (2025)

Portanto, as telhas solares, não são apenas uma alternativa tecnológica, mas também uma solução alinhada ao desenvolvimento sustentável e inclusivo, um princípio essencial da Tecnociência solidária, onde se encontra congruência com a Inovação Frugal. (SILVA, et. al, 2022).

A seguir no capítulo 3.4, foi apresentado a capacidade do artefato de fomentar a economia de forma solidária e circular, com geração de renda, em pró da sustentabilidade, desenvolvimento social tecnológico e inclusivo.

### **3.5 Perspectivas do Artefato como Tecnologia Social: Valorização dos Impactos Econômicos, Sociais e Ambientais**

Os artefatos, conforme Latour (2012), não são inertes; eles influenciam diretamente a ação humana, moldando práticas sociais e costumes. Nesse sentido, a teoria crítica das Ciências, Tecnologias e Sociedades (CTS) evidencia que os artefatos, inclusive os tecnológicos, não são apenas técnicos, mas carregam valores, intenções políticas e impactos sociais.

Segundo Latour (2000), os artefatos técnicos não podem ser analisados separadamente de seu contexto sociotécnico, sendo a tecnologia uma rede de atores humanos e não humanos que constroem significados e efeitos no mundo.

Latour (2000) também argumenta que a técnica é a sociedade materializada de forma durável, e que os artefatos refletem escolhas sociais e políticas, podendo incluir ou excluir, democratizar ou concentrar poder. A partir dessa perspectiva, Dagnino (2000) propõe o conceito de tecnologia social no contexto de tecnologias públicas e economia solidária, em que a produção científica deve atender às necessidades da população, especialmente grupos historicamente marginalizados.

Nesse contexto, as telhas de PEAD reciclado com grafeno estudadas aqui carregam potencial de gerar energia com custo menor que os painéis solares tradicionais, pois não necessitam de estrutura metálica adicional, reduzindo custos de instalação (Qi et al., 2022; Águas et al., 2011 apud Ahmed, 2024). Além disso, cabos e fios podem ser posicionados sob as telhas, protegendo-os de condições climáticas adversas, enquanto o processo de instalação é semelhante ao de telhas convencionais (Wajs et al., 2020; apud Ahmed, 2024).

O conforto térmico também é favorecido pela presença de materiais de mudança de fase, que melhoram o gerenciamento térmico, aumentando a eficiência na geração de energia, especialmente no caso de telhas de PEAD com grafeno. Sob a perspectiva social e ambiental, essas telhas representam energia verde de longo prazo, podendo superar a durabilidade de painéis fotovoltaicos tradicionais e mitigando emissões de gases de efeito estufa (Ahmed, 2024).

No contexto urbano e de infraestrutura energética, as telhas de PEAD reciclado com grafeno integram a geração de energia renovável à estrutura arquitetônica existente, promovendo eficiência energética, estética aprimorada e maior aceitação de tecnologias solares. Sua resistência às tensões ambientais assegura produção energética consistente, apoiando a transição para um futuro energético sustentável e alinhando-se às metas da ONU, em especial os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e 13 (Ação contra a Mudança Climática).

Como tecnologia social, o artefato atua como mediador de processos emancipatórios e coletivos, permitindo aprendizado, apropriação do conhecimento e inclusão social. Exemplo histórico dessa lógica é a implantação de cisternas de placas no semiárido nordestino, que promoveu acesso à água e fortalecimento comunitário por meio de tecnologia de baixo custo e mão de obra local (Dagnino, 2014).

No caso das telhas de PEAD reciclado com grafeno, o artefato combina inovação tecnológica, impacto social e sustentabilidade econômica, permitindo geração de energia solar

integrada, redução de custos de instalação, economia doméstica e autonomia energética, especialmente em áreas remotas ou com infraestrutura elétrica limitada.

Do ponto de vista socioeconômico, a fabricação dessas telhas promove a inclusão de cooperativas de catadores e recicladores, fortalecendo a economia circular e gerando renda a partir da reciclagem de PEAD.

Segundo a Abiplast (2023), são consumidas, 1,4 milhão de toneladas de plástico atualmente, porém, apenas 1% do plástico reciclado chega por catadores, enquanto 30% é fornecido por recicladores, 19% por beneficiadores, 13% por empresas de gestão de resíduos e 11% por cooperativas. Assim, ao aumentar a demanda por PEAD reciclado para a produção de telhas de grafeno, amplia-se a geração de emprego, renda e impacto socioambiental positivo.

O Gráfico 2 a seguir apresenta a origem de aquisição de matéria-prima por recicladores no Brasil, reforçando o potencial do artefato em integrar inovação tecnológica, sustentabilidade e inclusão social.

**Gráfico 2** - Origem de aquisição de matéria prima por recicladores no Brasil



Fonte: ABIPLAST (2024)

Segundo a Abiplast (2023) a reciclagem de plástico alcançou cerca de 20,6% pós consumo no Brasil, e segundo a Associação Brasileira de Embalagens – ABRE (2020), cerca de 27% de PEAD são de origem reciclada, visto em gráfico a seguir.

**Gráfico 3 - Índice de Reciclagem de Plástico Pós consumo no Brasil**



**Fonte:** ABRE(2021)

O artefato em estudo se apresenta como um objeto que vem em seu cerne não apenas como técnica, mas embutido em sua característica a capacidade de inclusão social e de integração da comunidade, pois, devido ao aumento da necessidade de uso de material reciclado, PEAD, pode-se fortalecer a geração de renda, por meio da utilização de mão de obra, de cooperativas de catadores. Figura 24.

**Figura 24** – Cooperativa de reciclagem de Plástico



**Fonte:** Abiplast (2024)

Portanto, o artefato telha demonstra apelo social, econômico e ambiental, ao integrar múltiplas dimensões de sustentabilidade. Ele promove inclusão social por meio da geração de energia a menor custo e contribui para o desenvolvimento econômico ao criar oportunidades de renda e ampliar a utilização da mão de obra de cooperativas e catadores de reciclagem.

Ao empregar material reciclado, reduz a extração de petróleo e evita o aumento de resíduos no meio ambiente, reforçando sua contribuição ambiental. Além disso, caracteriza-se como um artefato colaborativo, ao envolver diretamente catadores e recicladores na cadeia produtiva, fortalecendo práticas de economia circular e tecnociência solidária

## **4. RESULTADOS**

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise comparativa entre as telhas de PEAD reciclado com grafeno e os painéis solares convencionais, considerando parâmetros de custo, desempenho energético e impactos ambientais e sociais.

OS resultados estão vinculados aos procedimentos metodológicos, à aplicação do Design Science Research (DSR) e à análise dos artefatos estudados. Essa abordagem permite articular os

dados obtidos com os objetivos propostos, garantindo que as evidências estejam fundamentadas nos conceitos teóricos e nas etapas de análise do artefato.

Dessa forma, os resultados não apenas demonstram o desempenho técnico, econômico e social das telhas de PEAD reciclado com grafeno, mas também evidenciam a pertinência da inovação frugal e da tecnociência solidária na geração de soluções sustentáveis e inclusivas.

Os Resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados Energia e Custo**

|                      | <b>Telhas de PEAD<br/>com Grafeno</b> | <b>Painel Solar<br/>150w</b> |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| <b>Partes</b>        | 1                                     | 2                            |
| <b>Geração Total</b> | 30KWh/mês                             | 30,37KWh/mês                 |
| <b>Custo</b>         | ~ R\$ 147,30                          | ~ R\$ 558,90                 |

Fonte: Autor, (2025)

Com base nos resultados da Tabela acima, e considerando uma residência com consumo de 30KWh/mês, que segundo o (Ministério das Minas e Energia, 2024), que satisfaz o consumo de um consumidor de baixa renda no Brasil, beneficiado pela Tarifa Social, e que recebe o benefício de pagar 65% da tarifa base.

Foi verificado, por meio dos cenários de análises, conservador e otimista que, um único painel 150 W não é suficiente para garantir 30 kWh/mês, são necessários 2 painéis de 150W, pois, a geração de energia mensal média, teoricamente fica por volta de 22 a 25KWh/mês, ao custo aproximado de 3,8 vezes maior, que as telhas.

As telhas possuem custo médio de produção e instalação até 40% inferior ao dos painéis solares convencionais, gerando a mesma quantidade de energia, em termos estritamente, energéticos, (produção bruta mensal, estimada ideal), contra dois painéis solares comuns, representando uma redução significativa de investimento inicial.

Se considerarmos perdas, ainda assim seria possível suprir entre 70 a 90% da demanda, energética de uma residência média, dependendo das condições de insolação e da área de cobertura instalada. Essa performance é suficiente para garantir autossuficiência parcial e redução significativa da tarifa de energia elétrica, o que contribui para a democratização do acesso à energia

limpa e acessível, em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 10).

Além disso, a leveza e a facilidade de montagem das telhas resultam em custos de instalação ainda mais reduzidos, o que favorece sua adoção em contextos residenciais e comunitários. Assim, a eficiência energética global das telhas se apresenta superior à dos painéis, considerando o mesmo nível de demanda suprida e menor necessidade de módulos.

Se instalada em substituição de telhado convencional, as telhas tendem a gerar uma maior vantagem competitiva, pois, tende a ter custo menor devido sua capacidade de cobertura, e menor peso por área distribuída, levando a vantagem adicional, em relação ao quesito estrutura.

Do ponto de vista metodológico, o uso da abordagem DSR permitiu compreender o artefato como um produto tecnológico concebido para resolver problemas reais, neste caso, a busca por soluções energéticas sustentáveis, de baixo custo e de fácil acesso. O modelo possibilitou a identificação de relações entre a inovação frugal, a tecnociência solidária e o impacto social do artefato, confirmando sua relevância como tecnologia social.

No estudo, pode ser identificado, o caráter de Inovação frugal das telhas de Pead reciclado com grafeno, a medida que apresenta-se como um artefato de menor custo, que promove a acessibilidade, geração de renda e inclusão social, de maneira sustentável, o que satisfaz a premissa de “fazer mais com menos” (RADJOU; PRABHU; AHUJA, 2012).

Outro aspecto relevante, está presente na contribuição ambiental das telhas. Para cada 1 kg de PEAD reciclado utilizado, estima-se a economia de 1,75 kg de petróleo, além da mitigação de emissões associadas ao descarte de plásticos em aterros e incineradores. Assim, o artefato não apenas gera energia limpa, mas também reduz impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, consolidando-se como alternativa sustentável e circular.

Foi verificado que o artefato ao apresentar-se como uma Inovação frugal, foi capaz de responder as críticas a tecnociência, expostas por Dagnino, e ao satisfazer estas características, se comporta como um artefato de tecnologia social.

Por fim, ao promover redução de custo, democratizar a tecnologia, fortalecer a independência energética, promover sustentabilidade, inovação, inclusão social, adaptar-se as necessidades locais, gerar renda, e ao fortalecer a mão de obra de catadores e recicladores, as telhas

de PEAD reciclado, se comportam como um artefato que satisfaz as condições da Tecnociência de forma solidária.

## 4.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A discussão dos resultados parte da metodologia adotada entre os capítulos 3.1 e 3.5, na qual a pesquisa se estruturou em uma abordagem qualitativa e quantitativa, combinando análise comparativa, levantamento bibliográfico e avaliação experimental dos artefatos. Essa sequência metodológica possibilitou correlacionar os parâmetros técnicos, econômicos e sustentáveis das telhas de PEAD reciclado com grafeno, com os dos painéis solares convencionais, permitindo compreender as implicações sociais, ambientais e tecnológicas envolvidas no processo de desenvolvimento, de forma inovadora e equitativa, alinhada as necessidades.

Os resultados obtidos indicam que as telhas de PEAD reciclado com grafeno, apresentam desempenho energético superior ao dos painéis solares, atendendo integralmente a uma demanda residencial média de 30 kWh/mês, quando considerado cenário otimista, sem perdas. Essa constatação valida a hipótese levantada na etapa metodológica de que o uso do grafeno, aliado ao aproveitamento de resíduos plásticos, poderia ampliar a eficiência energética de artefatos.

O ensaio comparativo, descrito na metodologia, confirmou que uma única telha é suficiente para suprir a demanda de energia, com custo de fabricação e instalação, 40% inferior, onde são necessários dois painéis solares. Vale ressaltar que devido ao menor peso e capacidade de cobertura, necessita de menor estrutura para instalação, representando maior eficiência e vantagem competitiva em relação ao custo.

Este ponto se reafirma, por meio do índice, (Custo Unitário Básico) CUB, estabelecido pela Lei Nacional nº 4.591/64, calculado pelo Sindicato da Construção Civil de cada região, que afirma que: a estrutura de cobertura representa entre 3,0 e 6,5% do custo de uma obra (SIENGE, 2025). Esses dados reforçam sua competitividade e sua “tenacidade financeira” no ciclo de vida, conceito destacado por Herstatt e Tiwari (2020).

A análise de custos, realizada conforme os critérios definidos na etapa 3.3, demonstra a viabilidade econômica das telhas, sobretudo pela utilização de matéria-prima reciclada e pela

redução de etapas produtivas. Esse resultado reforça o caráter frugal da inovação, uma vez que o artefato combina simplicidade técnica, baixo custo e alta funcionalidade, e eficiência energética.

A análise econômica, também se apoia, nos estudos que reafirmam, o custo das telhas, 40% inferior ao dos painéis solares tradicionais, com vida útil estimada em 80 anos, em contraste aos 25–30 anos dos painéis (LEE et al., 2020; CPG, 2022; TECMUNDO, 2021; PORTA SOLAR, 2021).

Do ponto de vista da tecnociência solidária, os resultados dialogam com a abordagem proposta por Dagnino (2008), ao demonstrar que a aplicação de conhecimento científico pode gerar soluções tecnológicas inclusivas, acessíveis e sustentáveis. O desenvolvimento das telhas a partir de PEAD reciclado e grafeno evidencia a possibilidade de transformar resíduos em recursos energéticos, reforçando o papel do artefato como agente de desenvolvimento social e econômico local, conforme descrito no item 3.4 da metodologia.

Sob a ótica da sustentabilidade ambiental, discutida no item 3.5 da metodologia, observa-se que o ciclo de vida das telhas apresenta maior durabilidade, menor impacto ambiental e potencial de reintegração na cadeia produtiva após o uso, reduzindo significativamente a geração de resíduos plásticos, pois, cada quilo de PEAD reciclado evita a extração de 1,75 kg de petróleo, além de reduzir a pegada de carbono.

O grafeno, por sua vez, tem como base o grafite — abundante no Brasil — o que fortalece a sustentabilidade da cadeia produtiva. Assim, o artefato não apenas gera energia limpa, mas também contribui para a economia circular e para a mitigação das mudanças climáticas.

A discussão também evidencia que, embora as telhas apresentem custo reduzido e desempenho energético eficiente, sua implementação em larga escala depende de políticas públicas e incentivos de inovação sustentável, apontados como variáveis condicionantes na etapa metodológica 3.5.

Contudo, é preciso destacar as barreiras que ainda dificultam sua plena adoção. Entre elas, estão a viabilidade do fornecimento de grafeno em escala e a necessidade de investimentos em pesquisas voltadas a ampliar a capacidade de geração de energia. Essa ampliação poderia não apenas atender consumidores de baixa renda — beneficiados pela tarifa social — mas também alcançar a média nacional de 300 kWh/mês, contribuindo de forma mais efetiva para a matriz energética brasileira.

Assim, a integração entre pesquisa científica, iniciativa pública, sociedade e investimento privado torna-se essencial para consolidar a transição energética baseada em tecnologias acessíveis, inclusivas e com capacidade de geração de renda.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conclui-se que as telhas fabricadas com PEAD reciclado e grafeno promovem a sustentabilidade ao maximizar o reaproveitamento de resíduos plásticos, derivados de petróleo, transformando-os em um artefato durável e economicamente viável. Ao mesmo tempo, apresentam potencial de impulsionar a geração de energia limpa, tornando-a mais acessível e fortalecendo alternativas de baixo custo para atender às necessidades energéticas da população.

Os resultados quantitativos (eficiência, durabilidade e custo) e qualitativos (inclusão, tecnociência e sustentabilidade) permitem afirmar que as telhas de PEAD com grafeno configuram-se como solução viável e inovadora. Operam na interface entre a Inovação Frugal e a Tecnociência Solidária, respondendo aos desafios contemporâneos da inclusão energética, da sustentabilidade e da justiça tecnológica.

A análise comparativa com os painéis solares e com as controvérsias ligadas à tecnociência tradicional reforça sua capacidade de resposta como artefato inclusivo. Além de reduzir desigualdades e democratizar o acesso à energia limpa, a telha favorece a economia circular e adota uma lógica de tecnologia apropriada às necessidades locais, minimizando impactos ambientais.

O desenvolvimento do artefato mostra-se adaptativo, atendendo demandas sociais ao reduzir custos, gerar inclusão e ampliar o uso de materiais recicláveis. A adição do grafeno, por sua vez, melhora propriedades técnicas e prolonga o tempo de vida útil, tornando-o competitivo frente às soluções tradicionais.

Em termos ambientais e sociais, as telhas evidenciam capacidade de fomentar a economia circular e gerar renda. Sua produção pode envolver cooperativas e recicladores na coleta de PEAD, contribuindo para inclusão social e valorização do trabalho, além de reduzir a necessidade de extração de petróleo e de disposição inadequada de resíduos plásticos.

Apesar dos avanços, é necessário reconhecer as limitações da pesquisa. Os resultados ainda dependem de ensaios em escala real, prototipagem e análises de ciclo de vida. Fatores como desempenho em diferentes condições climáticas e maior comprovação laboratorial devem ser

investigados. Dessa forma, a consolidação dessa tecnologia como artefato social dependerá de políticas públicas, apoio a pesquisas aplicadas e fortalecimento de arranjos produtivos locais. A convergência entre inovação frugal e tecnociência solidária confirma, assim, a possibilidade de construir soluções de baixo custo e alto impacto social, capazes de impulsionar a sustentabilidade e o desenvolvimento socioambiental.

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. *Reciclagem de plásticos no Brasil: estudo aponta índice de 24,3% para as embalagens em 2023*. 2023-2024. Disponível em:

<https://www.abiplast.org.br/noticias/reciclagem-de-plasticos-no-brasil-estudo-aponta-indice-de-243-para-as-embalagens-em-2023/>. Acesso em: out. 2025.

ABRE. *Sustentabilidade, desenvolvimento sustentável*. 2020-2021. Disponível em:

<https://www.abre.org.br/sustentabilidade/231-dos-residuos-plasticos-pos-consumo-foram-recicladados-em-2020-no-brasil/>. Acesso em: out. 2025.

ACS OMEGA. *Recent advances in graphene-enabled materials for photovoltaic applications: a comprehensive review*. *ACS Omega*, v. 9, 2023. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.3c07994>. Acesso em: out. 2025.

AHMED, W.; SHEIKH, J. A.; KEREKES, T.; MARAMUD, P. M. A. Solar roof tiles: unleashing technical advantages and contribution to sustainable society. *Science of the Total Environment*, 2024.

ALMEIDA, R. L. de; MARICATO, J. de M. Explorando conceitos e métricas de inovação no contexto das universidades. *Informação & Informação*, Londrina, v. 26, n. 2, p. 646–679, 2021.

DOI: 10.5433/1981-8920.2021v26n2p646. Disponível em:

<https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/informacao/article/view/41606>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ANSELMO, A. *Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida*. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

ANTONOVZ, T.; CORREA, M. D.; COSTA, M. C. Social innovation and local development: an analysis in an agroenergy condominium for the family agriculture. *Business and Management Studies*, v. 6, p. 36, 2020.

ARAÚJO, C. A. L. A. Grafeno: composição, propriedades, aplicabilidade e perspectivas. *Revista Brasileira de Processos Químicos*, dez. 2022.

ARRIGHI, G. *A ilusão do desenvolvimento*. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 1998.

ASAKAWA, K.; CUERVO-CAZURRA, A.; UN, C. A. Vantagem baseada na frugalidade. *Long Range Planning*, v. 52, n. 4, p. 101879, 2019.

BASU, R.; PRABHU, J. Frugal innovation: meeting sustainable development goals in emerging economies. *Nature Sustainability*, 2021.

BELLUCCI, F.; VASQUES, H.; CONTI, J. *Panorama tecnológico do grafeno: contexto brasileiro e sua demanda por financiamento*. Rio de Janeiro: FINEP, 2021.

BHATTI, Y. *What is frugal innovation*. Oxford: Saïd Business School, University of Oxford, 2012.

BORZAGA, C.; BODINI, R. What to make of social innovation? Towards a framework for policy development. *Euricse Working Paper*, 2014.

BOUND, K.; THORNTON, I. *Our frugal future: lessons from India's innovation system*. London: Nesta, 2012.

BRANCO, B. P. *Projetos acadêmicos de competição tecnológica, política de inovação e a teoria de Andrew Feenberg*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal de Itajubá, 2020.

BRUNDTLAND, G. H. (Org.). *Nosso futuro comum*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Fundação Getúlio Vargas, 1987.

CALVO, S.; MORALES, A.; CASTANHO, R. A.; SANTOS, E. Promoting social innovation projects with an online course: creating global solutions for sustainability. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, p. 109–118, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-6585-2\_10.

CAMPIGOTTO SANDRI, E.; KUMASAKA, J. M. V. C.; WESTARB CRUZ, J. A.; CRUZARA, G. Avaliação do impacto social: um levantamento bibliométrico. *Teoria e Prática em Administração*, v. 11, n. 1, p. 106–121, 2020. DOI: 10.22478/ufpb.2238-104X.2021v11n1.52611.

CARVALHO, J.; PIMENTA, C.; OLIVEIRA, S. Entre a ciência e a complexidade dos novos objetos de pesquisa: a construção interdisciplinar de uma metodologia de pesquisa científica. *ECCOM*, Lorena, v. 9, n. 18, 2018.

CASSIOLATO, J.; SOARES, M. C. C.; LASTRES, H. Innovation in unequal societies: how can it contribute to improve equality? In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL, 2018.

COLELL, A. Biographies of social innovation and resource mobilization. *Energiepolitik und Klimaschutz: Energy Policy and Climate Protection*, p. 61–72, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-32307-3\_3.

CPG. *Novas telhas solares à base de grafeno possuem vida útil de 80 anos e geram economia de até 40% na conta de luz*. 2022. Disponível em: <https://clickpetroleogas.com.br/novas-telhas-solares-a-base-de-grafeno-possuem-vida-util-de-80-anos-e-geram-economia-de-ate-40-na-conta-de-luz/>. Acesso em: out. 2025.

CUSTO DA OBRA POR ETAPA. Disponível em: <https://www.sience.com.br/blog/custo-da-obra-por-etapa/>. Acesso em: 20 maio 2024.

DAGNINO, R.; THOMAS, H.; GOMES, E. *Tecnologia social: ferramentas para construir outra sociedade*. Campinas: Autores Associados, 2004.

DAGNINO, R. *Tecnociência solidária: um manual estratégico*. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

DAGNINO, R. O marco analítico-conceitual da tecnociência solidária. *REDES*, v. 25, n. 49, p. 61–62, 2019.

DAGNINO, R.; GOMES, E. Sistema de inovação social para prefeituras. In: *Conferência Nacional de Ciência e Tecnologia para Inovação*, São Paulo, 2020.

D'AMARIO, E. Q.; COMINI, G. M. Social innovation in Brazilian social entrepreneurs: a proposed scale for its classification. 2020. DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.11966349.

DAS, A. J. et al. Multiscale evaluation of recycled plastic corrugated panels for roofing and cladding. *MDPI*, 2025.

DICIONÁRIO MICHAELIS. São Paulo: Editora Melhoramentos, 2023.

DIMA, A.; BUGHEANU, A. M.; DINULESCU, R.; POTCOVARU, C. A.; STEFANESCU, I. Exploring the research regarding frugal innovation and business sustainability through bibliometric analysis. 2022.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2020.

FARCHI, T.; LOGUE, D.; FERNANDEZ, P. D.; VASSOLO, R. Seeking socially innovative solutions to complex social problems. *Academy of Management Proceedings*, v. 2019, p. 10170, 2019.

FEENBERG, A. *Questioning technology*. London: Routledge, 1999.

FEENBERG, A. *Transforming technology: a critical theory revisited*. Oxford: Oxford University Press, 2002.

FEENBERG, A. *Between reason and experience: essays in technology and modernity*. Cambridge: MIT Press, 2010.

FEITOSA, M. J. S.; SANO, H.; RAMOS, A. S. M. Barreiras e indutores da inovação social: uma revisão sistemática de literatura. *Studies in Social Sciences Review*, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 768–783, jul./set. 2022.

FIALHO, F. A. et al. *Gestão da sustentabilidade na era do conhecimento*. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FISCINA, L. Sustentabilidade: um conceito de organização social das ordens de conservação e transformação do mundo. *Universidade de São Paulo – Instituto de Psicologia*, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0001-8927-9404>.

FLEURY, A. L.; FLEURY, M. T. L.; OLIVEIRA, M. J. *Gestão da inovação: a gestão de ideias para a inovação*. 2020.

FOROUDI, P.; AKARSU, T. N.; MARVI, R.; BALAKRISHNAN, J. Intellectual evolution of social innovation: a bibliometric analysis and avenues for future research trends. *Industrial Marketing Management*, v. 93, p. 446–465, 2021.

FTHENAKIS, V. M. E. L. P. A. *Electricity from sunlight: photovoltaic systems integration and sustainability*. 2. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

GELLER, H.; SCHAEFER, R.; SZKLO, A.; TOLMASQUIM, M. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. *Elsevier*, p. 1437–1450, 2004.

GHIZONI, C. Reciclagem de resíduos industriais e competitividade: perspectivas para o setor de energia solar. *Revista Gestão & Produção*, v. 23, n. 4, p. 689–703, 2016.

GOVINDAN, K. How artificial intelligence drives sustainable frugal innovation: a multitheoretical perspective. *IEEE Transactions on Engineering Management*, jan. 2022. DOI: 10.1109/TEM.2021.3116184.

GRAFENO. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/grafeno/>. Acesso em: 10 abr. 2024.

GREENMATCH. Difference between monocrystalline and polycrystalline solar panels. 2022. Disponível em: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>. Acesso em: out. 2025.

HILL, J. C.; HAINS, K.; HAINS, B.; HUSTEDDE, R. A social innovation approach to programming to address social issues. *Community Development*, v. 53, p. 345–354, 2022.

HOSSAIN, M. Frugal innovation: a systematic literature review. *SSRN Electronic Journal*, 2016.

HOSSAIN, M. Frugal innovation: conception, development, diffusion, and outcome. *Journal of Cleaner Production*, 2020.

HWANG, B. N. et al. Inovação aberta e ambidestria organizacional. *European Journal of Innovation Management*, v. 26, n. 3, 2023.

ITS BRASIL. *Caderno de debate – tecnologia social no Brasil*. São Paulo: ITS, 2004.

JACOBSON, M. Z. et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for the 50 United States. *Energy & Environmental Science*, v. 8, n. 7, p. 2093–2117, 2015.

JAIN, N. O que é inovação social? *Ideascale Blog*, jun. 2023. Disponível em: <https://ideascale.com/pt-br/blogue/o-que-e-inovacao-social/>.

JONES, F. Grafeno na prateleira. *Revista Pesquisa FAPESP*, n. 345, p. 13–19, nov. 2024.

JOUVENET, M. *Sociologia da inovação: atores, práticas e dispositivos*. Porto Alegre: Sulina, 2019.

KALALI, E. N. et al. A critical review of the current progress of plastic waste valorization and circular economy in construction. 2023.

KISTMANN, V. Interdisciplinaridade: questões quanto à pesquisa e à inovação em design. *Estudos em Design*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 81–99, 2014.

KOERICH, G. V.; CANCELLIER, É. L. P. de L. Inovação frugal: origens, evolução e perspectivas futuras. *Cadernos EBAPE.BR*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p. 1079–1093, 2019. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/cadernosebape/article/view/74424>. Acesso em: 20 maio 2024.

KUMAR, S.; PANDEY, J. K.; SINGH, R. K.; MISHRA, S. A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 893–910, 2011. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.04.003.

LATOUR, B. *Jamais fomos modernos*. Rio de Janeiro: Editora 34, 2000.

LATOUR, B. *Reassembling the social: an introduction to actor-network-theory*. Oxford: Oxford University Press, 2005.

LATOUR, B. *Reagregando o social: uma introdução à teoria do ator-rede*. Salvador: EDUFBA, 2012.

LATOUR, B. *Cogitamus: seis cartas sobre as humanidades científicas*. São Paulo: Editora 34, 2016.

LEE, N. Exploring renewable energy opportunities in select Southeast Asian countries: a geospatial analysis of the levelized cost of energy of utility-scale wind and solar photovoltaics. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Golden, CO (United States), 2020.

LEITE, L. A.; SOUZA, M. J.; SILVA, A. P. Potencialidades da economia circular na agricultura brasileira. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 16, n. 1, p. 22–36, 2022.

- LIMA, R. F.; JABBOUR, C. J. C. Economia circular no Brasil: desafios e oportunidades para a inovação sustentável. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 10, n. 2, p. 45–60, 2021.
- LIVARI, J.; VENABLE, J. Action research and design science research – seemingly similar but decisively dissimilar. In: *European Conference on Information Systems*, 17. Verona, 2009.
- LIVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY; ZAKHARCHYN, H. Social innovations: main aspects. *Black Sea Economic Studies*, 2022. DOI: 10.32843/bses.75-12.
- MANSANO, L.; PAVELOSKI, E.; PINTO, E. Benefícios da logística reversa do polietileno: um estudo de caso. *Revista Fabnova*, v. 1, 2019.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Tecnologia social*. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/politica\\_nacional/\\_social/Tecnologia\\_Social.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/politica_nacional/_social/Tecnologia_Social.html). Acesso em: 20 maio 2024.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *Tarifa social: saiba como funciona e quem pode pedir desconto*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/tarifa-social-saiba-como-funciona-e-quem-pode-pedir-desconto>. Acesso em: 20 maio 2024.
- MONGABAY. Report urges stricter mining standards to manage climate and social impacts. 2025.
- MOURTZIS, D. Design of customised products and manufacturing networks: towards frugal innovation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 31, n. 12, p. 1161–1173, 2018. DOI: 10.1080/0951192X.2018.1509131.
- MULVANEY, D. *Solar power: innovation, sustainability, and environmental justice*. Oakland: University of California Press, 2019.
- NABARRETO, R.; CIRANI, C.; TORRES Jr, A. O poder de compra estatal: elemento de fomento da sustentabilidade e da inovação. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 20, p. 315–331, 2021. DOI: 10.48075/csar.v20i38.28650.
- NASCIMENTO, C. R. F. *Gestão da sustentabilidade e gestão de projetos: caminhos para integração dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) na política das organizações*. [S. l.], s.d.
- NEDER, L.; AZEVEDO, R. *Inovação na prática não funciona*. São Paulo: Scortecci, 2022.
- NURCHOLIDAH, L. et al. Conflito profissional, familiar, estresse no trabalho e envolvimento dos funcionários no comportamento inovador no trabalho: papéis mediadores da adaptabilidade de carreira. *Revista de Direito e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, n. 5, 2023.

OLIVEIRA, M. B. Desmercantilizar a tecnociência. In: SANTOS, B. S. (org.). *Um discurso sobre a ciência revisitado*. São Paulo: Cortez, 2004.

PACHECO, A. S. V.; SANTOS, M. J.; SILVA, K. V. da. Dos objetivos ao surgimento de uma inovação social: um estudo de caso em uma organização da economia solidária. *P2P & Inovação*, Rio de Janeiro, v. 4, n. 2, p. 119–140, 2018.

PATNAIK, J.; BHOWMICK, B. Promise of inclusive innovation: a re-look into the opportunities at the grassroots. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, 2020.

P. B. R.; R. P. R.; G. V. K. R. Social innovation (SI) – objectives, challenges, problems and benefits, methodology, key dimensions and mechanism for social change in India. *International Journal for Multidisciplinary Research*, v. 5, 2023.

PILARCZYK, M.; WOZNIAK, M. Public aid for social innovations in the European Union – macroeconomic perspective. *Social Entrepreneurship Review*, v. 1, 2019.

PIMENTA, C. A. M. Tendência do desenvolvimento: elementos para reflexão das dimensões sociais na contemporaneidade. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, Taubaté: UNITAU, 2014.

PORTAL ODS. *Conheça a telha brasileira capaz de gerar energia elétrica a partir da luz solar*. Disponível em: <https://portalods.com.br/noticias>. Acesso em: 20 maio 2024.

PORTAL SOLAR. *Telha de grafeno transforma luz solar em energia elétrica*. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/telha-de-grafeno-transforma-luz-solar-em-energia-eletrica>. Acesso em: out. 2025.

PRABHU, J. Frugal innovation: doing more with less for more. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 375, p. 20160372, 2017. DOI: 10.1098/rsta.2016.0372.

PRAHALAD, C. K.; RAMASWAMY, V. *The future of competition: co-creating unique value with customers*. Boston: Harvard Business School Press, 2004.

RADJOU, N.; PRABHU, J.; AHUJA, S. *Jugaad innovation: think frugal, be flexible, generate breakthrough growth*. San Francisco: Jossey-Bass, 2012.

RADJOU, N.; PRABHU, J. *Frugal innovation: how to do more with less*. London: Profile Books, 2014.

RAMASWAMY, V.; OZCAN, K. *The co-creation paradigm*. Stanford: Stanford University Press, 2014.

RELATÓRIO DE SITUAÇÃO GLOBAL REN21. *Renewables 2022: global status report*. 15 jun. 2022. Disponível em: <https://renewablesroadmap.iclei.org>.

REINALDO, C. M.; PINTO, F. R. Ecosistema de inovação social: uma revisão sistemática. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, Boa Vista, v. 16, n. 48, p. 580–604, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10445529. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/2966>. Acesso em: 13 nov. 2024.

RENZI, M. Energia solar e inclusão social: um estudo sobre os impactos da difusão da energia fotovoltaica. *Revista Brasileira de Políticas Públicas e Energias Renováveis*, v. 12, n. 1, p. 101–118, 2020.

REPO, P.; MATSCHOSS, K. Social innovation for sustainability challenges. *Sustainability*, v. 12, p. 319, 2019.

RESOURCE-RECYCLING. Study looks at number of times HDPE can be recycled. *Resource Recycling*, 2018. Disponível em: <https://resource-recycling.com/plastics/2018/09/26/study-looks-at-number-of-times-hdpe-can-be-recycled/>. Acesso em: 1 out. 2025.

RIBAS, F. T. T.; MACKE, J. University-society integration through action research projects. *World Sustainability Series*, p. 479–493, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-59975-1\_32.

RIBEIRO, I. S. *Impacto do grafeno na eficiência dos painéis solares fotovoltaicos: uma revisão bibliográfica*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2024.

RIBEIRO, R. B.; GALEGAL, N. V.; SIMÕES, E. A.; VIANA, A. *Frugal innovation*. São Paulo: Centro Paula Souza, 2022.

ROCHA, C. *A interdisciplinaridade do design e território para revalorizar, repensar e ressignificar um artefato tradicional da terra caipira paulista*. Itajubá, 2022.

ROCHA, S. F.; RIBEIRO, R. B. Análise comparativa das telhas de cerâmica convencionais com as telhas PEAD com grafeno. In: *Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica*, 26., 2022, São José dos Campos. Anais [...]. Universidade do Vale do Paraíba, 2022.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial intelligence: a modern approach*. 4. ed. New Jersey: Pearson, 2021.

SANTOS, D. M.; OLIVEIRA, G. F. Inovações tecnológicas como facilitadoras da economia circular no Brasil. *Revista de Tecnologia e Sociedade*, v. 17, n. 3, p. 12–27, 2021.

SANTOS, G. A.; ARAÚJO, T. Análise do grafeno segundo sua utilização na construção civil seguindo os conceitos sustentáveis. *Revista de Ciência e Tecnologia*, UFRR, v. 8, 2022.

SCHUMPETER, J. A. *The theory of economic development*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1934.

SCOTT, D.; SMITH, A. Solar farms and community impacts in Canada: a socio-environmental critique. *Canadian Journal of Environmental Studies*, v. 22, n. 3, p. 55–70, 2017.

SEN, A. *Desenvolvimento como liberdade*. Tradução de Laura Teixeira Motta. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

SIENGE. *Custo por etapa de obra: como calcular e controlar seu orçamento*. 2025. Disponível em: <https://sienge.com.br/blog/custo-por-etapa-de-obra/>. Acesso em: out. 2025.

SILVA, A. et al. Tecnologia social e inovação frugal: perspectivas para o desenvolvimento sustentável. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 18, n. 47, p. 1–20, 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/16013>.

SILVA, C. G. *Inovação como estratégia de competitividade*. Marília: Faculdade de Tecnologia de Marília, 2023.

SILVA, F.; NODARI, C. H.; CHAYM, C. D. Construindo a ponte entre a inovação frugal e sustentabilidade: uma revisão sistemática de literatura. In: *Seminários em Administração*, 25., 2022, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: USP, 2022. DOI: 10.1108/JIBR-03-2013-0025.

SILVA, H. R.; ARAÚJO, V. R. Políticas públicas e economia circular no Brasil: um panorama das iniciativas e desafios. *Cadernos de Sustentabilidade*, v. 8, n. 1, p. 33–48, 2021.

SIMON, H. A. *The sciences of the artificial*. Cambridge: MIT Press, 1996.

SOUZA, P. R.; MENDES, T. R.; ALMEIDA, F. S. Desafios e oportunidades para a gestão de resíduos na transição para a economia circular no Brasil. *Revista Brasileira de Gestão de Resíduos*, v. 5, n. 2, p. 14–29, 2021.

SOUZA, R. A.; ALMEIDA MORAES, R. Políticas de educação, tecnologia e inovação: contribuições para uso emancipatório das tecnologias. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, Araraquara, v. 17, n. 2, p. 1457–1472, abr./jun. 2022. DOI: 10.21723/riaee.v17i2.15876.

SOVACOOOL, B. K. When renewable energy meets social justice: assessing global solar power controversies. *Energy Policy*, v. 156, p. 112–126, 2021.

SUN, Y.; SHI, G.; WU, Q. Graphene-based new energy materials. *Energy & Environmental Science*, n. 4, p. 1113–1114, 2011.

TECMUNDO. *Telha solar com grafeno é aposta da Telite para gerar energia*. 2021. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/219944-telha-solar-grafeno-aposta-telite-gerar-energia.htm>. Acesso em: 20 maio 2024.

TEIXEIRA, J. Sustentabilidade: o que é, como funciona, benefícios e exemplos. *Blog FIA*, 20 set. 2023. Disponível em: <https://fia.com.br/blog/sustentabilidade/>.

TOLMASQUIM, M. T. *Fontes alternativas de energia no Brasil*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004.

TRIPATHI, S. N. et al. Polyolefin/graphene nanocomposites: a review. *RSC Advances*, v. 7, n. 38, p. 23615–23632, 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Recycling basics and benefits*. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/recycling-basics-and-benefits>. Acesso em: 1 out. 2025.

WALLERSTEIN, I. El concepto de desarrollo. In: *Impensar las ciencias sociales: límites de los paradigmas decimonónicos*. Madrid: Siglo XXI de España Editores, 1999. p. 47–137.

WANG, L.; ASLANI, F. A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 229, p. 116892, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116892.

WEYRAUCH, T.; HERSTATT, C. What is frugal innovation? Three defining criteria. *Journal for Frugal Innovation*, 2017.

WIDIONO, G. W.; FATHURRAHMAN, R.; WIJAKSONO, J. Public value creation in local government context: a bibliometric analysis. *Journal of Local Government Issues*, v. 7, p. 18–36, 2024.

WONG, J. W. C. et al. High-density polyethylene/graphene nanocomposites with enhanced mechanical, electrical, and thermal properties. *Composites Part B: Engineering*, v. 146, p. 19–26, 2018.

ZANANDREA, G. Inovação frugal: uma análise bibliométrica da produção na base Scopus. Disponível em: <https://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucsppga/xvmostrappga/paper/viewFile/4215/1324>. Acesso em: 1 out. 2025.

ZESCHKY, M.; WINTERHALTER, S.; GASSMANN, O. From cost to frugal and reverse innovation: mapping the field and implications for global competitiveness. *Research Technology Management*, v. 57, n. 4, p. 20–27, 2014. DOI: 10.1080/08956308.2014.11614023.