



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DO SALVADOR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TERRITÓRIO, AMBIENTE E**  
**SOCIEDADE**

**JOÃO PAULO BARBOSA DA SILVA**

**NOVAS TECNOLOGIAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS PARA**  
**CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES**

Salvador  
2025

**JOÃO PAULO BARBOSA DA SILVA**

**NOVAS TECNOLOGIAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS PARA  
CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Território, Ambiente e Sociedade, da Universidade Católica do Salvador, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Território, Ambiente e Sociedade.

Orientador: Profa. Dra. Cristina Maria Dacach Fernandez Marchi

Salvador  
2025

Dados de Catalogação na Publicação (CIP)  
Ficha Catalográfica. UCSAL. Biblioteca Dom Geraldo Majella Agnelo

S586 Silva, João Paulo Barbosa da  
Novas tecnologias dos resíduos sólidos plásticos para construção de  
cidade inteligentes / João Paulo Barbosa da. Silva. – Salvador, 2025.  
72 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica do Salvador. Pró-Reitoria  
de Pesquisa e Pós-Graduação. Mestrado em Território, Ambiente e Sociedade.

Orientadora: Profa. Dra. Cristina Maria Dacach Fernandez Marchi.

1. Sustentabilidade Urbana 2. Inovação Tecnológica 3. Gestão  
Ambiental 4. Economia Circular 5. Reciclagem Avançada I. Marchi,  
Cristina Maria Dacach Fernandez – Orientadora II. Universidade Católica  
do Salvador. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação III. Título.

CDU 628.4.043

**JOÃO PAULO BARBOSA DA SILVA**

**NOVAS TECNOLOGIAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS PARA  
CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Território, Ambiente e Sociedade, da Universidade Católica do Salvador, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Território, Ambiente e Sociedade.

Salvador, 27 de março de 2025.

## TERMO DE APROVAÇÃO


JOÃO PAULO BARBOSA DA SILVA

### “NOVAS TECNOLOGIAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS PARA CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES”.

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de  
Mestre(a) em Território, Ambiente e Sociedade.

Salvador, 28 de abril de 2025.

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**CRISTINA MARIA DACACH FERNANDEZ MARCHI**  
Data: 28/04/2025 18:12:30-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>


---

Profa. Dra. Cristina Maria Dacach Fernandez Marchi (orientadora - UCSAL)

 Documento assinado digitalmente  
**KATIA REGINA BENATI**  
Data: 30/04/2025 11:28:39-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

---

Profa. Dra. Katia Regina Benati (examinadora interna - UCSAL)

 Documento assinado digitalmente  
**VIRGINIA SILVA NEVES**  
Data: 29/04/2025 17:45:41-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

---

Profa. Dra. Virginia Silva Neves (examinadora externa - IFBA)

Dedico este trabalho à minha esposa, Isa Guimaraes Duarte, meu porto seguro e maior incentivadora nesta caminhada. Sua paciência, apoio incondicional e força me sustentaram em cada etapa desta jornada, dos momentos de dúvida às pequenas vitórias. Sem você ao meu lado, este sonho não teria se tornado realidade. Com todo o meu amor e gratidão, este esforço é também seu.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. À minha esposa, Isa Guimaraes Duarte, meu agradecimento especial por sua presença constante, paciência e apoio inabalável ao longo desta jornada. Seu incentivo e compreensão foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, transformando os desafios em momentos de aprendizado e força.

À minha orientadora, Profa. Dra. Cristina Maria Dacach Fernandez Marchi, meu reconhecimento pela dedicação, sabedoria e orientação que guiaram este trabalho. Sua expertise e confiança em mim foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa, e sou imensamente grato por ter contado com seu suporte acadêmico e humano.

À CAPES, agradeço pelo suporte financeiro por meio da bolsa que viabilizou minha dedicação integral a este mestrado. Esse apoio foi crucial para que eu pudesse me concentrar nos estudos e na pesquisa, tornando este projeto possível.

Ao Programa de Território, Ambiente e Sociedade da Universidade Católica do Salvador, minha gratidão pela oportunidade de integrar um espaço de aprendizado e reflexão tão ricos. A estrutura oferecida e o ambiente acadêmico proporcionaram as condições necessárias para que eu pudesse crescer como pesquisador e contribuir para o campo do planejamento ambiental.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, cruzaram meu caminho durante este processo, meu sincero obrigado. Este trabalho é o resultado de muitas mãos e corações que me ajudaram a torná-lo realidade.

## RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos plásticos tem impulsionado a busca por novas tecnologias para a gestão sustentável desses materiais. O presente estudo tem como objetivo analisar as tecnologias inovadoras de resíduos sólidos plásticos que podem ser utilizadas para o alcance das cidades inteligentes. A pesquisa utilizou uma abordagem dedutiva, baseada em revisão bibliográfica que analisou 15 tecnologias voltadas para a reciclagem e o reaproveitamento de plásticos. As tecnologias foram categorizadas de acordo com 11 eixos temáticos, sendo eles: governança, mobilidade, meio ambiente, economia, qualidade de vida, inovação e tecnologia, planejamento urbano, energia, segurança, educação e saúde. Foi demonstrado que a maioria das tecnologias inovadoras está concentrada em países com maior capacidade de investimento, como Alemanha, Índia e Estados Unidos, enquanto no Brasil prevalecem soluções de menor custo, como a reciclagem mecânica e a inclusão de catadores no sistema formal de gestão de resíduos. No entanto, identificou-se um potencial significativo para a implementação de sistemas de coleta inteligente e reciclagem química, desde que haja incentivos públicos e investimentos em infraestrutura. Conclui-se que a adoção dessas tecnologias pode contribuir para a transição do Brasil para um modelo mais sustentável de gestão de resíduos plásticos além de que sua aplicação poderá classificar a cidade como uma cidade inteligente. Para isso, recomenda-se a formulação de políticas públicas que incentivem a inovação, bem como a promoção de programas de capacitação profissional e incentivos fiscais para empresas que adotem soluções tecnológicas ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: sustentabilidade urbana; inovação tecnológica; gestão ambiental; economia circular; reciclagem avançada.

## **ABSTRACT**

The growing concern about the environmental impacts caused by the improper disposal of plastic waste has driven the search for new technologies for the sustainable management of these materials. This study aims to analyze innovative solid plastic waste technologies that can be used to achieve smart cities. The research employed a qualitative approach, based on a literature review that examined 15 technologies focused on plastic recycling and reuse. The technologies were categorized into 11 thematic areas: governance, mobility, environment, economy, quality of life, innovation and technology, urban planning, energy, security, education, and health. The study demonstrated that most innovative technologies are concentrated in countries with greater investment capacity, such as Germany, India, and the United States, while in Brazil, lower-cost solutions prevail, such as mechanical recycling and the inclusion of waste pickers in the formal waste management system. However, significant potential was identified for the implementation of smart collection systems and chemical recycling, provided there are public incentives and infrastructure investments. It is concluded that the adoption of these technologies can contribute to Brazil's transition to a more sustainable plastic waste management model, and their application may classify the city as a smart city. To achieve this, it is recommended to develop public policies that encourage innovation, as well as the promotion of professional training programs and tax incentives for companies that adopt environmentally responsible technological solutions.

**Keywords:** urban sustainability; technological innovation; environmental management; circular economy; advanced recycling.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2 O IMPACTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE PLÁSTICOS NO MEIO AMBIENTE E A IMPORTÂNCIA DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3 CONCEITOS E DISCUSSÕES SOBRE CIDADES INTELIGENTES.....</b>	<b>17</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
<b>5 TECNOLOGIAS PARA RESÍDUOS PLÁSTICOS COMO POSSÍVEIS PARA ALCANÇAR O STATUS DE CIDADES INTELIGENTES.....</b>	<b>34</b>
5.1 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 4 OU MENOS EIXOS TEMÁTICOS .....	35
5.2 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 5 EIXOS TEMÁTICOS.....	37
5.3 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 6 OU MAIS EIXOS TEMÁTICOS .....	39
5.4 TECNOLOGIAS DE ACORDO COM A QUANTIDADE DE EIXOS TEMÁTICOS CUMPRIDOS .....	41
5.5 TECNOLOGIAS QUE ABORDAM SOBRE O EIXO DO MEIO AMBIENTE .....	44
5.6 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS COM BASE EM SEU CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO .....	45
5.6.1 Tecnologias com maior custo de implementação .....	47
5.6.2 Tecnologias com médio custo de implementação .....	50
5.6.3 Tecnologias com menor custo de implementação .....	52
5.7 CONTRIBUIÇÕES DAS TECNOLOGIAS APRESENTADAS E A ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE SEREM APLICADAS NO BRASIL.....	54
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As cidades inteligentes são caracterizadas pelo uso intensivo de tecnologias de informação e comunicação para melhorar a eficiência dos serviços urbanos e promover o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a gestão de resíduos sólidos, particularmente os plásticos, é um aspecto crucial para a construção de ambientes urbanos mais resilientes e sustentáveis.

Na perspectiva de cidades inteligentes, a gestão eficiente dos resíduos sólidos plásticos envolve a integração de diversas tecnologias que promovem a redução, reutilização e reciclagem dos materiais. Soluções como a coleta inteligente, que utiliza sensores para otimizar rotas de coleta e evitar o transbordo de lixeiras, e a reciclagem química, que permite a transformação dos plásticos em novos produtos, são exemplos de como a inovação tecnológica pode contribuir para a sustentabilidade urbana.

O desenvolvimento de novas tecnologias para a gestão de resíduos plásticos nas cidades inteligentes também pode estimular a economia circular, promovendo a reutilização dos materiais e a criação de novos modelos de negócios. Iniciativas como a transformação de resíduos plásticos em materiais de construção ou em combustível alternativo são exemplos de como essas tecnologias podem agregar valor aos resíduos, transformando-os em recursos valiosos para a economia urbana.

O objetivo geral deste estudo é analisar as tecnologias inovadoras de resíduos sólidos plásticos que podem ser utilizadas para o alcance das cidades inteligentes. Para atingir esse objetivo geral, foram estabelecidos três objetivos específicos, que guiaram a estrutura da dissertação.

O primeiro objetivo específico foi investigar os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos plásticos no meio ambiente, buscando compreender os desafios e as consequências desse problema global.

O segundo objetivo específico foi investigar o conceito e as diferentes concepções de cidades inteligentes, analisando como esse modelo urbano pode contribuir para a sustentabilidade e para uma gestão mais eficiente de resíduos.

Por fim, o terceiro objetivo específico foi levantar e analisar o estado da arte das novas tecnologias inovadoras aplicáveis à busca pelo desenvolvimento sustentável das cidades inteligentes, com foco nas soluções voltadas para a gestão de resíduos plásticos.

Desta forma, a presente pesquisa adota uma abordagem dedutiva, fundamentada em um estudo bibliográfico. A pesquisa foi desenvolvida por meio do levantamento de teses,

dissertações e artigos científicos publicados em revistas especializadas, com um recorte temporal que abrange os anos de 2020 a 2024

Foram identificadas 15 novas tecnologias com potencial de impacto positivo na gestão de resíduos plásticos. A análise dos dados foi realizada por meio da investigação de conteúdo temática, permitindo a identificação de quantos eixos temáticos dentre eles a Mobilidade, Urbanismo, Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Educação, Saúde, Segurança, Empreendedorismo e Energia que as tecnologias estudadas contemplam. Ademais, foi possível a análise das tecnologias com base no seu custo de implementação, ou seja, se ela possui um alto, médio ou baixo custo de implementação com base na complexidade da mão de obra requerida. Após esse levantamento, as tecnologias foram discutidas considerando sua viabilidade no contexto brasileiro, levando em conta fatores como infraestrutura existente, políticas públicas vigentes e impactos socioeconômicos.

Os achados da pesquisa evidenciam ainda que a gestão eficaz dos resíduos sólidos plásticos é um fator crítico para o futuro das cidades. A combinação de inovação tecnológica e práticas sustentáveis pode não apenas solucionar problemas ambientais urgentes, mas também impulsionar o desenvolvimento econômico e social. A reciclagem mecânica, os sistemas de coleta inteligente e a digestão anaeróbia foram identificados como tecnologias acessíveis e adaptáveis à realidade brasileira, com potencial para aprimorar a eficiência da gestão de resíduos.

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. A presente introdução que contém uma breve contextualização e metodologia do trabalho, os objetivos específicos e gerais. O segundo capítulo investiga os impactos ambientais trazidos pelos resíduos sólidos de plásticos ao meio ambiente. Quanto ao terceiro capítulo, esse aborda o conceito e as concepções de cidades inteligentes. O quarto capítulo, por sua vez, apresenta a metodologia adotada na presente dissertação. O quinto capítulo traz as análises das 15 tecnologias estudadas com base no cumprimento dos eixos temáticos, custo de implementação, observando ainda a possibilidade de aplicação dessas tecnologias no Brasil. Por fim, no sexto capítulo, se apresentam as considerações finais desta dissertação.

## **2 O IMPACTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE PLÁSTICOS NO MEIO AMBIENTE E A IMPORTÂNCIA DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Nas últimas décadas, o padrão de comportamento da sociedade vem sendo modificado em razão da crise ambiental vivenciada no mundo. O aumento da poluição e utilização predatória das riquezas naturais têm causado a destruição e poluição de florestas e rios. Dentre estas práticas, estão o saneamento básico inadequado e a falta de novas tecnologias para reúso dos resíduos sólidos (Silva; Marchi, 2024).

De acordo com Duarte (2022), o meio ambiente é extremamente importante para o desenvolvimento das atividades econômicas, razão pela qual seu cuidado é necessário. Afinal, os recursos humanos são limitados enquanto as necessidades humanas são ilimitadas. Por isso, entender o conceito do meio ambiente é de suma importância para propor medidas de proteção e novas tecnologias em prol da proteção ambiental.

Nesse sentido, de acordo com Dulley (2004), existem inúmeras interpretações sobre o conceito de ambiente e meio ambiente. Para melhor compreensão desses institutos, é preciso previamente abordar o conceito de natureza, uma vez que está diretamente ligado aos supracitados institutos. Segundo Dulley (2004), a natureza é algo que o homem consegue enxergar, ou seja, é uma concepção criada pelo próprio homem, de acordo com sua vivência. A natureza, neste sentido, pode ser compreendida como um artista pintando um quadro. A sua percepção sobre o que se vê, seu estilo de pintar, as cores que escolhe para reproduzir o que se olha depende de suas convicções previamente aprendidas. Desta forma, observa-se que a natureza é pensada a partir das relações sociais que o ser humano enxerga. A partir do conhecimento da natureza, o ser humano foi construindo o seu ambiente.

Para Dulley (2004), o ambiente compreende o conjunto de condições favoráveis e que possam sustentar os seres vivos no ambiente. Já o significado de meio ambiente é a junção de pré-requisitos que sustentam os seres vivos na biosfera como um todo ou em parte desta, abrangendo organismos, clima, solo e água. Nesta perspectiva, define-se meio ambiente como a soma total das condições externas circundantes no interior das quais um organismo ou um objeto existe.

Partindo da perspectiva que a natureza, o ambiente e o meio ambiente estão diretamente ligados, é possível compreender que estes termos se encontram interligados, porém não se confundem (Dulley, 2004).

A natureza é aquilo que o homem consegue enxergar a partir do ambiente, o ambiente é a parte dinâmica, ou seja, aquela que dá sustento aos seres vivos que habitam o meio. E este

último é o espaço, ou seja, a camada exógena capaz de abrigar vida e elementos físico-químicos na terra. Desta forma, o meio ambiente é a junção da parte dinâmica com a parte exógena, de suma importância para perpetuação da vida (Dulley, 2004).

É importante destacar que o meio ambiente é de suma importância para a permanência do ser humano e da vida na Terra. Em razão disso, a Constituição Federal (CF) de 1988 consagrou um capítulo exclusivo para abordar sobre a proteção ao meio ambiente (Brasil, 1998).

De acordo com o art. 225 da CF, todo cidadão tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. Sabe-se que a Constituição Federal é lei supra, a qual todo cidadão deve respeitar. Ela é reforço do contrato social, além de positivizar aquilo que deve ser seguido pelos cidadãos. Atrelado a isso vemos a importância do meio ambiente, uma vez que a constituição aborda que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e é quesito essencial para uma boa qualidade de vida, de modo que deve ser preservada para a presente e as futuras gerações (Brasil, 1998).

O supracitado artigo da CF tem por finalidade salvaguardar a dignidade da pessoa humana, considerado um dos princípios mais importantes no ordenamento jurídico porque salvaguarda não só direitos esparsos, mas é a espinha dorsal dos direitos fundamentais, como o da proteção à saúde, uma vez que sem o meio ambiente não é possível se ter a proteção à vida. Afinal, sem meio ambiente é impossível a permanência do ser humano na terra. Além disso, ao se proteger o meio ambiente se busca a proteção da presente e das futuras gerações que gozarão destes direitos (Duarte, 2022).

Por sua vez, de acordo com Marchi (2021), a melhor maneira de se compreender um fenômeno jurídico é aprender suas características essenciais e considerar o direito como um conjunto de normas de conduta. Ainda de acordo com a autora, o texto constitucional estabelece apenas princípios constitucionais basilares no corpo da Constituição, mas não trata de forma específica e detalhada sobre a questão dos resíduos sólidos.

Marchi (2021) destaca como princípios que fundamentam o gerenciamento dos resíduos sólidos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado; a competência comum dos entes federativos para proteger e combater a poluição; os instrumentos de proteção ambiental, na medida de preservar e restaurar processos ecológicos essenciais; responsabilidade por danos ambientais, na medida que aquele que explorar recursos naturais tem a obrigação de recompor o meio ambiente degradado; função social da propriedade que vincula a propriedade ao seu uso adequado e sustentável; e a política urbana sustentável que trata de garantir o bem-estar dos

habitantes e o equilíbrio ambiental das cidades, regulamentado por meio do estatuto da cidade (Lei 10.257/2001).

Desta maneira, conforme aborda Marchi (2021), esses princípios são basilares para as leis posteriores que surgiram para regulamentar as questões envolvendo os resíduos sólidos. A partir desses princípios e disposições constitucionais, foi criada a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, um marco regulatório quanto à gestão dos resíduos sólidos no Brasil. Essa lei estabeleceu, dentre outras questões, a responsabilidade compartilhada dos produtos com o setor público, setor privado e os cidadãos, além de incentivar a reciclagem, a reutilização e a destinação adequada para tais resíduos (Borba; Luz; Marchi, 2021).

Importante salientar que, de acordo com Marchi (2015), a poluição do meio ambiente é uma das pautas mais importantes a serem discutidas e solucionadas para os anos posteriores, uma vez que se trata, acima de tudo, de uma questão de sobrevivência.

De acordo com Duarte e Baiardi (2024), cujo estudo pautou-se na análise do conceito de desenvolvimento sustentável, fundamental para abordar a proteção ao meio ambiente, desenvolvimento sustentável é o instituto utilizado para se discutir quanto aos problemas, dentre eles, o ambiental, enfrentados pelo modo de produção capitalista e o futuro da vida na terra, incluindo, neste, os seres humanos.

De acordo com as discussões trazidas por Duarte e Baiardi (2024), o desenvolvimento sustentável é a incorporação de um novo modelo de desenvolvimento, segundo o qual abarca o respeito à dignidade da pessoa humana que garante a qualquer cidadão a liberdade de escolhas e de direitos básicos, como saúde, educação e qualidade de vida, além do respeito e da salvaguarda do meio ambiente para os presentes e as futuras gerações, este último sendo um direito e uma obrigação de todos.

Por outro lado, o consumo exacerbado resultado do modo de produção capitalista nos moldes atuais gera um conjunto acentuado de rejeitos no meio ambiente que deve ser observado sob o prisma do desenvolvimento sustentável. Estes, entre outras classificações, podem ser considerados como resíduos sólidos (Duarte, 2022).

De acordo com a norma brasileira NBR 10004:1987, que classifica e conceitua os resíduos sólidos, estes são definidos como materiais nos estados sólido ou semissólido resultantes de atividades humanas (ABNT, 1987).

Estes resíduos são resultados da interação social do homem e, assim como sua criação, é de sua responsabilidade seu descarte adequado. Por isso, precisam ser geridos de modo a serem reutilizados, reciclados ou que sejam encaminhados para os locais de destino adequados (Mota, 2009).

Segundo Marchi (2016), é uma questão de sobrevivência humana a minimização da degradação do meio ambiente. Ainda segundo a autora, a destinação inadequada dos resíduos sólidos causa um impacto ambiental volumoso decorrente dos dejetos destinados incorretamente.

Os resíduos sólidos de plásticos, também chamados de resíduos de plástico (RP), referem-se a uma espécie de resíduos sólidos, ou seja, produzidos pelo homem e que são descartados após o uso. Esses resíduos incluem uma variedade de produtos, desde embalagens e sacos até microplásticos que são lançados no meio ambiente.

Por sua vez, cabe destacar que a produção de plástico aumentou nos últimos anos de acordo com a pesquisa realizada pela World Economic Forum (2019), o que gerou grandes quantidades de resíduos acabando em aterros, rios e oceanos. A má gestão destes resíduos pode causar impactos ambientais negativos, como poluição hídrica e ambiental, bem como problemas de saúde humana devido à contaminação da cadeia alimentar, sendo apenas parte deste material reciclado (World Economic Forum, 2019; Harper *et al.*, 2019).

Os RPs têm um impacto profundo no meio ambiente, especialmente nos oceanos. Grande parte do plástico descartado acaba no mar, onde pode levar centenas de anos para se decompor completamente (Harper *et al.*, 2019). Durante esse longo período, os plásticos são frequentemente ingeridos por animais marinhos, como tartarugas, aves e peixes, causando obstruções internas, sufocamento e, muitas vezes, morte. Além disso, o plástico se fragmenta em microplásticos. Estes pequenos fragmentos são facilmente consumidos por organismos marinhos, entrando na cadeia alimentar e eventualmente chegando até os seres humanos através do consumo de frutos do mar (Harper *et al.*, 2019).

No solo, os resíduos plásticos também representam uma ameaça significativa. À medida que os plásticos se degradam, eles liberam substâncias químicas tóxicas que contaminam o solo e as fontes de água subterrânea. Essa contaminação afeta a qualidade do solo, prejudicando o crescimento das plantas e a biodiversidade. Além disso, as toxinas liberadas pelos plásticos podem infiltrar-se em cursos d'água, impactando negativamente a vida aquática e representando um risco direto à saúde humana, pois muitas comunidades dependem dessas fontes de água para consumo (World Economic Forum, 2019).

A produção e o descarte de plásticos também têm implicações significativas para a crise climática. A fabricação de plástico é altamente intensiva em energia, contribuindo significativamente para a emissão de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono. Além disso, a incineração de plásticos como forma de descarte libera ainda mais gases nocivos na atmosfera, exacerbando o aquecimento global. A degradação dos plásticos no meio ambiente

também libera substâncias químicas que agravam a poluição atmosférica, tornando a gestão desses resíduos um desafio global urgente (World Economic Forum, 2019).

De acordo com Mota (2009), ratificando a pesquisa da World Economic Forum (2019), o descarte inadequado dos resíduos sólidos, conhecido usualmente como “lixo”, ou seja, sem nenhum tratamento, pode afetar tanto o solo quanto o ar e/ou a água. Ainda de acordo com o autor, esses detritos podem afetar o solo de diversas maneiras, como tornar o solo infértil, degradar a vida dos microrganismos que vivem nele, além de alterar suas características físico-químicas, o que representa uma ameaça à saúde pública, tornando o ambiente propício para as bactérias que acabam gerando doenças para os seres humanos.

A poluição do ar e o descarte inadequado desses dejetos no solo podem gerar formação de gases decorrentes da quantidade de resíduo acumulado, o que origina risco de explosões no local e/ou até doenças respiratórias (Mota, 2009).

Para Marchi (2016), a minimização dos resíduos sólidos deve começar em sua origem, ou seja, é preciso que se modifique a cultura social para que os resíduos sejam separados corretamente desde o início da geração desses resíduos. Ademais, é preciso da intensificação da coleta seletiva com a inclusão de catadores de materiais recicláveis, para que os materiais, após tratados, possam ser reaproveitados pela indústria como insumos.

De acordo com a Associação de Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) (IBGE, 2022), que trabalha na promoção de reciclagem no Brasil, no ano de 2020 de todo o plástico produzido no Brasil, apenas 23,1 % dele foi reciclado. A gestão dos resíduos sólidos é uma preocupação mundial e os países buscam uma solução através do compartilhamento das ações entre o poder local, as organizações e a sociedade civil organizada (Marchi, 2016).

Ligado a isso, a busca para melhoria da qualidade de vida das cidades não cabe unicamente ao Estado, ela deve ser partilhada com todos, inclusive com usuários dos serviços públicos de saneamento básico. Desta maneira, busca-se, mesmo que de modo ainda preliminar, auxiliar o poder público na busca de alternativas para o reúso de resíduos sólidos de plásticos que está incluso no conceito de resíduos sólidos como um de seus elementos (Marchi, 2016).

De acordo com Marchi (2015), a complexidade da prestação de serviços de coleta, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos envolve diferentes esferas a serem responsáveis, mas as normas precisam fundamentar a interligação e responsabilidade entre sociedade, meio ambiente e resíduos sólidos gerados.

Diante desse quadro, criou-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Por meio desta lei, instituiu-se os princípios, objetivos,

instrumentos, as diretrizes da gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, sendo uma de suas políticas a utilização da logística reversa, fundamentada pelo princípio do poluidor pagador, uma vez que aquele que produz deve ser responsabilizado pelos resíduos gerados.

Por sua vez, no ano de 2022, 12 anos após a criação da PNRS, a lei foi regulamentada por meio do decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Uma das finalidades do decreto foi de responsabilizar os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, titulares dos serviços públicos de limpeza pelos resíduos sólidos gerados pela sociedade. Ou seja, desta forma, todos são responsáveis, devendo a todos a contribuição, destinação ou o auxílio ao correto manejo dos rejeitos (Brasil, 2022).

Uma das contribuições trazidas pelo decreto foi a regulamentação do programa de logística reversa, cujo objetivo é otimizar a implementação de operacionalização da infraestrutura física e de logística, proporcionar ganhos de escala e possibilitar sinergia entre os sistemas (Brasil, 2022).

Em razão da criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e do decreto que a regulamentou, a referida lei, para responsabilizar os fabricantes, comerciantes e congêneres, deve promover, por intermédio de novas tecnologias, a minimização dos resíduos sólidos na medida em que modifica a cultura social da população por meio de indução de comportamentos em prol da proteção ambiental.

### 3 CONCEITOS E DISCUSSÕES SOBRE CIDADES INTELIGENTES

Neste capítulo, aborda-se o conceito de cidades inteligentes, porque é um conceito preliminar para a compreensão posterior de como essas cidades podem gerir melhor os seus resíduos sólidos plásticos.

Fernandes, Vasconcelos e Lemos (2022), em estudo sobre a abordagem de cidades inteligentes, desdobram o conceito em dois momentos do artigo. Primeiro discutem a relação entre cidades e políticas públicas; depois, se debruçam sobre a ideia de cidades inteligentes. De acordo com os autores, os projetos de cidades inteligentes, para não passarem de uma narrativa, precisam melhorar a vida em comum.

Segundo Fernandes, Vasconcelos e Lemos (2022), a compreensão do conceito de cidades inteligentes exige a mobilização de três termos fundamentais: inteligência, cidade e política. Esses elementos são essenciais para a construção de uma análise abrangente e contextualizada do tema.

De acordo com Fernandes, Vasconcelos e Lemos (2022), por trás dos conceitos de inteligência, política e cidades, que precedem o conceito de cidades inteligentes, as cidades podem ser caracterizadas como um espaço de transformação por meio das pessoas, suas diversas inteligências, naturezas e transformações ao longo do tempo, o que resulta na construção desta cidade que se conhece.

Ainda de acordo com os autores supracitados nos parágrafos anteriores, a definição de cidade reflete a complexidade e a diversidade de papéis que as cidades desempenham nas esferas social, econômica, política e ambiental, incorporando noções de sustentabilidade, urbanidade, inteligência e atuação estratégica (Fernandes; Vasconcelos; Lemos, 2022).

Inteligência, para os autores, é um fenômeno que perpassa várias dimensões e conhecimentos, tem um elo com a ideia de política, até pela origem das palavras. Fernandes, Vasconcelos e Lemos (2022) afirmam que o termo “*polis*”, em latim, deu origem à palavra cidade. Este mesmo radical, por sua vez, originou a própria palavra “política”.

Para os autores, há uma interjeição entre as relações, os sistemas de organização de uma cidade e seu poder. A Inteligência nesta medida se materializa nas cidades por meio da política, que pode ser ainda configurada como as políticas públicas, que variam suas necessidades de acordo com cada cidade. Por essa razão, os autores destacam que, para caracterizar uma cidade como inteligente, é necessário analisar de forma singular cada uma de suas necessidades específicas. O que se configura como uma necessidade para Salvador, por exemplo, difere das demandas da cidade de São Paulo (Fernandes; Vasconcelos; Lemos, 2022).

Partindo-se dos conceitos preliminares que remontam à ideia de cidades inteligentes, passa-se às divergências e aos conceitos de alguns autores sobre esta expressão. Segundo Harrison e Donnelly (2011), a terminologia “cidades inteligentes” não é nova. Teve sua origem no movimento *Smart Growth* (SG) que, de acordo com Alves (2019), é conceito que precede o termo cidades inteligentes. SG, de acordo com o autor, significa que as cidades precisam ter um crescimento ordenado mais compacto e mais agradável para a comunidade, na medida em que tende a minimizar os impactos do crescimento desordenado. O termo *Smart Growth*, para o autor, é fundamento que se traduz em arcabouço para as novas políticas de planejamento urbano, como as políticas públicas relativas a um crescimento mais ordenado das cidades. Por isto, é caracterizado como um termo que antecede cidades inteligentes (Alves, 2019).

De acordo com Harrison e Donnelly (2011), uma das cidades a ser caracterizada como *Smart Growth* foi a província de Portland, localizada no estado de Oregon, nos Estados Unidos. A expressão foi adotada não apenas pelo serviço público.

Na sequência, o termo foi sendo discutido e reconhecido pelas cidades e seus atores políticos, que utilizaram das inovações de base tecnológica no planejamento e desenvolvimento das cidades, partindo para o entendimento de cidades inteligentes que se conhece hoje.

No entanto, importante ressaltar que, de acordo com Araújo, Cachafeiro e Villela (2014), a abordagem das cidades inteligentes restrita à utilização de tecnologias não se limita apenas à eficiência operacional, mas também busca promover a participação cidadã, a transparência governamental e a inovação em diversos setores. Isso significa que as cidades inteligentes não apenas utilizam tecnologia para melhorar serviços, mas também buscam envolver os cidadãos no processo de tomada de decisão e no desenvolvimento de soluções para os desafios urbanos e integrar com a sustentabilidade ambiental.

No cerne dessa abordagem, Giffinger e Gudrun (2010), citados por Araújo, Cachafeiro e Villela (2014), defendem que abordar o conceito de cidades inteligentes implica torná-las mais humanas, ou seja, mais centradas nas necessidades e no bem-estar dos cidadãos.

Para Hall (2000), em consonância com os autores Araújo, Cachafeiro e Villela (2014), uma cidade para torna-se inteligente necessita criar meios de monitorar suas atividades, como comunicação, água, energia, entre outros, por meio da tecnologia, para poder conseguir otimizar seus recursos, planejar suas atividades de manutenção e prevenção e monitorar aspectos de segurança enquanto maximiza os serviços ao cidadão e, por consequência, melhora sua qualidade de vida.

Toppeta (2010), por sua vez, aponta que o conceito de cidades inteligentes está diretamente ligado à visão de futuro do desenvolvimento urbano. O autor ainda afirma que,

além do termo cidades inteligentes, também podem ser usados os termos “cidades pervasiva”, “cidade sustentável”, ou “cidade digital” como sinônimos.

Toppeta (2010), abordando sob a mesma perspectiva de Araújo, Cachafeiro e Villela (2014), define cidades inteligentes como uma área geográfica bem definida, para a qual as tecnologias, como tecnologia da informação e comunicação, cooperem para criar benefícios para o cidadão em termo de bem-estar, qualidade ambiental e desenvolvimento inteligente. O autor ainda acrescenta que precisa existir uma forte relação entre os cidadãos, a tecnologia e a governança.

Já de acordo com os autores Weiss, Bernardes e Consoni (2015), o conceito de cidades inteligentes é uma forma de amenizar o problema do crescimento desordenado das cidades, porém os autores frisam que mesmo que as cidades se tornem inteligentes, não irá resolver o problema do crescimento populacional desordenado, mas irá organizá-lo.

De acordo com os autores, as cidades inteligentes poderão facilitar ao poder público a alocação de recursos para os setores que têm maior necessidade, de modo a tornar a população das cidades mais igualmente assistidas, o que, por consequência, gera uma melhor qualidade de vida dentro dessas cidades.

De acordo com os autores Mané, Fregadolli e Vareschini (2021), as cidades são os corações pulsantes da sociedade, onde a diversidade de pessoas e ideias se entrelaçam em busca de oportunidades e qualidade de vida. No entanto, o crescimento acelerado das áreas urbanas tem colocado desafios significativos em nosso caminho, incluindo questões ambientais, sociais e econômicas.

Ainda segundo os autores, uma cidade precisa unir a tecnologia e a inovação para criar um ambiente urbano mais eficiente, acessível e amigável para seus habitantes. Uma cidade inteligente é muito mais do que apenas uma maravilha tecnológica; é uma promessa de melhor qualidade de vida, onde a sustentabilidade é o alicerce que sustenta todas as suas ações (Mané; Fregadolli; Vareschini, 2021).

Para Kanter e Litow (2009), para a cidade se tornar inteligente, em concordância com Mané, Fregadolli e Vareschini (2021), necessita integrar a tecnologia de maneira inteligente para melhor gerir sua estrutura. Além disso, destacam a necessidade da tecnologia social. De acordo com os autores, abordar sobre a tecnologia social para tornar uma cidade inteligente é integrar a sociedade às decisões das políticas públicas da cidade. Ou seja, é preciso do apoio do cidadão segundo o aspecto social. Para os autores, trata-se de um processo de suma importância, pois o cidadão é a interseção entre os setores da cidade para assim tornar a cidade inteligente.

A seguir, quadro com os principais conceitos trazidos pelos autores estudados.

**Quadro 1** – Informações quanto aos conceitos de cidades inteligentes dos autores trabalhados na dissertação

Autor	Ano	Título	Resumo	Achados
Robert E. Hall, B. Bowerman, J. Braverman, J. Taylor, H. Todosow e U. von Wimmersperg	2000	The Vision of A Smart City	Os autores apresentam uma visão da cidade do futuro baseada na integração da ciência e tecnologia através de sistemas de informação.	Os autores afirmam que o futuro das cidades exigirá repensar a relação entre governo, gestores municipais, empresas, academia e pesquisa.
Rosabeth Moss Kanter e Stanley S. Litow	2009	Informed And Interconnected : A Manifesto For Smarter Cities	O objetivo dos autores é apresentar uma nova abordagem para a transformação comunitária que exige que os líderes usem a tecnologia da informação para conectar pessoas.	Os autores afirmam que, na atual crise econômica, a ação de conectar pessoas por meio da tecnologia da informação fornece ferramentas para superar a resistência a mudanças e transformar os problemas em uma grande oportunidade de reduzir custos, melhorar os serviços de comunicação e tornar a cidade mais inteligente.
D. Toppeta	2010	The smart city vision: how innovation and ICT can build smart, “livable”, sustainable cities	A definição de cidades inteligentes, caracterizadas por processos de informação flexíveis, mecanismos de facilitação da inovação, soluções e plataformas inteligentes e sustentáveis, o novo cenário urbano destaca a criação de valor como propósito central e o processo central de troca entre os atores.	O autor teve como objetivo reler as cidades inteligentes à luz das práticas de cocriação de valor, tentando captar os fatores que os administradores locais podem alavancar para buscar um desenvolvimento mais agudo das comunidades locais.
Rudolf Giffinger e Gudrun Haindl	2010	Smart Cities Ranking: An Effective Instrument For		Os autores tiveram como objetivo concentrarem-se primeiramente na questão de quais são as

		The Positioning Of Cities?		características básicas de rankings de cidades nacionais e internacionais. Da mesma forma, um número selecionado de classificações de cidades é analisado a fim de identificar diferentes tipos de tais classificações.
C. Harrison e I. A. Donnelly	2011	A Theory Of Smart Cities	Os autores descrevem etapas sobre <i>The Urban Systems Collaborative</i> para a maioria dos setores existentes das cidades, como arquitetura, engenharia, setor público, para que eles possam aprender mutuamente. Eles utilizam as cidades inteligentes como um exemplo de Urban Systems Collaborative.	As cidades inteligentes abordadas pelos autores desenvolveram tecnologias importantes para o desenvolvimento tanto de cidades emergentes quanto de cidades já desenvolvidas, no entanto os autores enfatizam a importância das cidades inteligentes para as cidades emergentes, ademais os autores sugerem uma maturação dos fundamentos e conceitos de cidades inteligentes.
Marcos Cesar Weiss, Roberto Carlos Bernardes e Flavia Luciane Consoni	2015	Cidades inteligentes como nova prática para o gerenciamento dos serviços e infraestruturas urbanas: a experiência da cidade de Porto Alegre	O conceito de cidades inteligentes é uma forma de amenizar o problema do crescimento desordenado das cidades, porém os autores frisam que mesmo que as cidades se tornem inteligentes, não irá resolver o problema do crescimento populacional desordenado, mas irá organizá-lo.	Os autores informam que as cidades inteligentes poderão facilitar ao poder público a alocação de recursos para os setores que têm maior necessidade, e assim tornando a população das cidades mais igualmente assistidas e, por consequência, gerando uma melhor qualidade de vida dentro dessas cidades.
Ana Fernandes, Pedro	2022	Cidades e inteligência	Os autores elaboram um texto sobre a abordagem de	O discurso sobre as cidades <i>smarts</i> é mobilizado para

Vasconcelos e André Lemos			<p>idades inteligentes. Para tanto, desdobram o conceito em dois momentos do artigo. Primeiro, discutem a relação entre cidades e políticas públicas, depois se debruçam sobre cidades inteligentes. De acordo com os autores, os projetos de cidades inteligentes, para não passarem de uma narrativa, precisam melhorar a vida em comum.</p>	<p>convencimento (social, político e econômico) sobre a necessidade de implementação de dispositivos digitais que dariam à vida urbana um caráter mais criativo, participativo, sustentável, resiliente e seguro — ou seja, mais “inteligente”. Em muitos casos, no entanto, isso não passa de uma narrativa.</p>
---------------------------	--	--	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011), Cidades inteligentes são aquelas que incorporam tecnologias avançadas, como sistemas de informação, Internet das Coisas (IoT) e Big Data, com o objetivo de aprimorar a gestão dos serviços urbanos e a qualidade de vida de seus cidadãos. Essas cidades se distinguem pela integração de soluções tecnológicas inovadoras que possibilitam uma utilização mais eficiente e sustentável dos recursos urbanos, tornando os processos mais acessíveis. O conceito de cidade inteligente também abrange a criação de ambientes urbanos interconectados, onde a colaboração entre diferentes atores – incluindo governos, empresas, academia e cidadãos – é vital para o desenvolvimento de soluções criativas e adaptáveis às necessidades locais.

A implementação dessas tecnologias visa resolver problemas urbanos como tráfego, segurança, gestão de resíduos e fornecimento de serviços públicos, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade e a inclusão social. No entanto, é fundamental ressaltar que para que as cidades realmente se tornem inteligentes, os projetos devem ir além da mera adoção tecnológica; é necessário que busquem transformar a vida urbana de maneira significativa e que beneficiem a população de forma equitativa (Caragliu; Del Bo; Nijkamp, 2011).

Diante dos desafios apresentados, o objetivo do capítulo 4 é discorrer sobre práticas de gestão de resíduos sólidos para o alcance das cidades inteligentes.

De acordo com os resultados do estudo desenvolvido pela empresa de consultoria Urban Systems (2023) revelou o ranking das cidades mais conectadas e inteligentes do Brasil. De

acordo com Urban Systems (2023), as cidades brasileiras com maior potencial de desenvolvimento de acordo com o mapeamento de 656 municípios com mais de 50 mil habitantes considerou 74 indicadores em 11 eixos temáticos: Mobilidade; Urbanismo; Meio Ambiente; Tecnologia e Inovação; Economia; Educação; Saúde; Segurança; Empreendedorismo; Governança; e Energia. Os resultados apontaram para a cidade de Florianópolis (SC) como a líder no ranking geral do estudo. Curitiba (PR) e São Paulo (SP) ficaram no segundo e terceiro lugares respectivamente. Salvador (BA), por sua vez, ficou em nono lugar (Urban Systems, 2023).

O quadro a seguir apresenta os eixos temáticos considerados na avaliação, destacando os aspectos fundamentais que caracterizam uma cidade inteligente:

**Quadro 2** – Resumo dos 11 eixos temáticos apresentados pela pesquisa Urban Systems (2023)

Eixo Temático	Descrição
<b>1. Mobilidade</b>	Infraestrutura e serviços de transporte, acessibilidade e eficiência na locomoção urbana.
<b>2. Urbanismo</b>	Planejamento urbano, habitação, uso do solo e qualidade dos espaços públicos.
<b>3. Meio Ambiente</b>	Sustentabilidade, gestão de resíduos, qualidade do ar e áreas verdes.
<b>4. Tecnologia e Inovação</b>	Investimento em tecnologia, acesso à internet, startups e digitalização de serviços públicos.
<b>5. Economia</b>	Desenvolvimento econômico, mercado de trabalho e competitividade dos municípios.
<b>6. Educação</b>	Qualidade do ensino, acesso à educação básica e superior, investimentos e indicadores de desempenho.
<b>7. Saúde</b>	Infraestrutura hospitalar, cobertura do SUS, número de médicos por habitante e qualidade dos serviços de saúde.

<b>8. Segurança</b>	Índices de criminalidade, investimento em policiamento, monitoramento e políticas de segurança pública.
<b>9. Empreendedorismo</b>	Incentivo ao empreendedorismo, número de empresas ativas, ambiente de negócios e inovação.
<b>10. Governança</b>	Transparência, participação social, eficiência na administração pública e digitalização de serviços.
<b>11. Energia</b>	Uso de fontes renováveis, eficiência energética e políticas de sustentabilidade.

Fonte: Elaborado com base nos dados do *Ranking Connected Smart Cities 2023* (Silva; Marchi, 2024).

De acordo com o estudo, para ser considerada uma cidade inteligente, é necessário cumprir pelo menos 6 dos 11 eixos temáticos estabelecidos. Esses eixos englobam aspectos como governança, mobilidade, meio ambiente, economia, qualidade de vida, inovação e tecnologia, planejamento urbano, energia, segurança, educação e saúde (Urban Systems, 2023).

A classificação das cidades inteligentes, segundo a Urban Systems, considera 11 eixos temáticos que refletem o nível de desenvolvimento urbano sustentável e tecnológico dos municípios brasileiros. Esses eixos abrangem diferentes dimensões estruturais que impactam diretamente a qualidade de vida da população e a eficiência da gestão pública.

O primeiro eixo, Mobilidade, refere-se à eficiência dos sistemas de transporte, acessibilidade e infraestrutura urbana. A mobilidade inteligente busca otimizar fluxos de deslocamento, promovendo transporte público integrado e sustentável, reduzindo congestionamentos e incentivando meios de transporte menos poluentes (Urban Systems, 2023).

O Urbanismo, por sua vez, está relacionado ao planejamento territorial, considerando habitação, uso do solo e qualidade dos espaços públicos. A ocupação ordenada do espaço urbano é essencial para evitar crescimento desordenado e promover cidades mais sustentáveis, priorizando a humanização dos espaços urbanos e a integração entre diferentes áreas da cidade (Alves, 2019).

O Meio Ambiente é um eixo central na avaliação das cidades inteligentes, englobando políticas ambientais, qualidade do ar, gestão de resíduos sólidos e preservação de áreas verdes. A adoção de práticas sustentáveis e tecnologias para mitigação de impactos ambientais tem sido

um desafio para a gestão urbana, especialmente em cidades em crescimento acelerado (Brasil, 2022). Em complemento, o eixo Tecnologia e Inovação mede o investimento em conectividade digital, inovação tecnológica e digitalização de serviços públicos. O uso de inteligência artificial, Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*) e big data favorecem a gestão eficiente dos municípios, permitindo uma tomada de decisão mais precisa e ágil (Harrison; Donnelly, 2011).

A Economia também desempenha um papel fundamental no desenvolvimento urbano inteligente, refletindo a geração de empregos, crescimento econômico e atração de investimentos. Cidades inteligentes buscam fortalecer seus mercados locais, promovendo um desenvolvimento sustentável e diversificado, impulsionado por setores inovadores e políticas de incentivo à competitividade (Fernandes; Vasconcelos; Lemos, 2022).

Já o eixo Educação avalia a qualidade do ensino, o acesso à educação básica e superior e o uso de tecnologia na aprendizagem. A capacitação da população é um fator essencial para fomentar inovação e desenvolvimento social, garantindo a formação de profissionais qualificados para atuar nos setores estratégicos das cidades inteligentes (Araújo; Cachafeiro; Villela, 2014).

O eixo Saúde está relacionado à infraestrutura hospitalar, cobertura do Sistema Único de Saúde (SUS), disponibilidade de médicos e uso de tecnologias na gestão da saúde pública. A telemedicina, os prontuários eletrônicos e a digitalização dos serviços de atendimento são exemplos de inovação na área, que visam melhorar a eficiência do setor e a acessibilidade da população aos serviços de saúde (Silva, 2024).

A Segurança também é um critério essencial para cidades inteligentes, sendo avaliada por meio de índices de criminalidade, investimento em policiamento e tecnologias de monitoramento urbano. Sistemas como câmeras inteligentes e reconhecimento facial contribuem para o fortalecimento da segurança pública e a redução da violência urbana (Giffinger; H., 2010 *apud* Araújo; Cachafeiro; Villela, 2014).

Outro aspecto fundamental é o Empreendedorismo, que mede a quantidade de startups, incentivos para novos negócios e ambiente de inovação. O fortalecimento do empreendedorismo promove a diversificação econômica e o crescimento sustentável das cidades, criando um ecossistema favorável ao desenvolvimento de novas tecnologias e modelos de negócio disruptivos (Urban Systems, 2023).

O eixo Governança está relacionado à transparência pública, participação cidadã e eficiência da administração municipal. A digitalização de serviços e a governança participativa

são fatores essenciais para fortalecer a relação entre governo e população, garantindo maior eficiência nos processos administrativos e na gestão de recursos (Estatuto da Cidade, 2001).

Por fim, o eixo Energia avalia o uso de fontes renováveis, eficiência energética e políticas de sustentabilidade. O investimento em energia limpa e redes inteligentes reduz custos, minimiza impactos ambientais e garante maior segurança energética para as cidades, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (NBR 10004, 1987).

A análise desses eixos demonstra que cidades mais bem classificadas no ranking investem de forma equilibrada nesses aspectos, promovendo sustentabilidade, inovação e qualidade de vida para seus habitantes. Dessa forma, uma cidade inteligente não é apenas aquela que adota tecnologia, mas sim aquela que combina inovação com planejamento urbano eficiente e políticas públicas voltadas ao bem-estar da população.

Alguns desafios estão ligados ao processo transformador que as cidades vêm sofrendo para aprimorar seus sistemas de saneamento, mobilidade, energia, segurança e digitalização, ou seja, a busca para modificar o padrão atual das cidades contemporâneas até a condição de cidades inteligentes.

Um dos principais desafios se encontra na adoção das políticas de sustentabilidade socioambientais no setor do saneamento básico, como a adoção de reúso e reciclagem de materiais; redução do consumo de energia e de água; aplicação de planejamento urbano por meio da gestão participativa, governo-cidadãos, dentre outros. Para Carvalho e Gonçalves (2023), a sociedade vem paulatinamente exigindo das organizações a adoção de “[...] modelos de desenvolvimento sustentável, conciliando as suas políticas econômicas com as de natureza socioambiental” (Carvalho; Gonçalves, 2023, p. 98).

Os autores prosseguem apontando a Logística Reversa como ferramenta em prol da sustentabilidade (Carvalho; Gonçalves, 2023), já que adota preceitos como os supracitados, ou seja, minimização no uso dos recursos naturais, redução da geração de resíduos sólidos e reutilização pelas organizações para reaproveitamento, seja como matéria prima, seja por meio de novas tecnologias.

Reportagem do site da ENGIE (2023) aponta que ações para alcance de condição de cidade inteligente perpassam desde a eficiência energética até a economia circular dos resíduos sólidos, adotando tecnologias suportadas por infraestruturas de fibra ótica, redes móveis 4G/5G, *data centers*, que permitam atender aos desafios e à visão transformadora das zonas urbanas.

A inadequada gestão dos resíduos sólidos proporciona nos centros urbanos, segundo Moraes e Borja (2009): (1) limitações de ordem financeira, como orçamentos inadequados, fluxo de caixas desequilibrados, taxas desatualizadas, quando existe, arrecadação insuficiente

e inexistência de linha de crédito específica; (2) pouca capacidade institucional; (3) deficiência na capacitação técnica e profissional do gari ao engenheiro-chefe; (4) descontinuidade política e administrativa; (5) uso de tecnologias inadequadas às realidades institucional, operacional, à disponibilidade de recursos humanos e financeiros e aos aspectos de ordem sociocultural; (6) falta de programas de educação ambiental; (7) pouco envolvimento da sociedade com a problemática dos resíduos sólidos; e, (8) ausência de controle ambiental. Como pode ser observado, as consequências descritas pelos autores sobre gestão ineficiente de resíduos sólidos condenam cidades a almejarem a condição de cidade inteligente (March & Silva *et al.*, 2024).

## 4 METODOLOGIA

A presente pesquisa tem o seguinte questionamento norteador: Como as tecnologias inovadoras de resíduos sólidos de plásticos podem ser utilizadas para o alcance de cidades inteligentes?

Para tanto, foram analisadas 15 tecnologias. Este levantamento foi feito por meio de um estudo bibliográfico utilizando teses, dissertações e artigos científicos publicados em revistas especializadas. Por se tratar de uma dissertação de mestrado, o presente trabalho se utilizou de um recorte temporal para o levantamento das tecnologias a serem estudadas.

Na busca dessas tecnologias, optou-se pelo lapso temporal de 2020 até 2024. Esse período fora escolhido para garantir que fossem as mais atualizadas tecnologias referentes à gestão de resíduos sólidos plásticos e sua aplicação no contexto das cidades inteligentes, além de coincidir com a análise e um levantamento possível dentro do prazo de 48 meses estabelecidos para a elaboração de uma dissertação.

Para alcançar o problema de pesquisa do presente trabalho, foi realizado o levantamento bibliográfico do tema dos resíduos sólidos plásticos. Nesse sentido, foram utilizadas, nas bases de dados da SciELO, Web of Science e Scopus, as seguintes palavras-chave: “sustentabilidade urbana”, “inovação tecnológica”, “tecnologias de reciclagem avançada”. Com a busca, foram encontrados 35 trabalhos no Scopus, 40 no Web of Science e 30 trabalhos na SciELO.

Para garantir um embasamento sólido, foram coletados 150 artigos de bases científicas reconhecidas, sendo elas: Scopus (35 artigos), Web of Science (40 artigos), SciELO (30 artigos), Google Acadêmico (45 artigos). Os trabalhos foram observados segundo a sua relevância temática: foco em resíduos sólidos plásticos e sua aplicação em cidades inteligentes; ano de publicação, por conta do recorte temporal estabelecido entre 2020 e 2024, exceto referências clássicas para embasamento teórico. As pesquisas que foram priorizadas relacionam-se com aquelas que apresentaram estudos de caso, revisões sistemáticas ou experimentações práticas.

Após a triagem, 85 artigos foram selecionados para análise. Os demais 65 foram descartados por não atenderem aos critérios estabelecidos. Dos 85 artigos selecionados para a análise e construção da presente pesquisa, 50 foram utilizados diretamente na fundamentação teórica e discussão; 20 forneceram dados complementares, mas não foram citados diretamente; 15 foram eliminados na fase final da revisão porque tratavam-se de trabalhos em duplicidade ou fora do escopo da pesquisa.

Os artigos descartados incluíam publicações que tratavam de resíduos plásticos em contextos não urbanos, estudos que não apresentavam tecnologias a serem apresentadas neste trabalho.

Observa-se deste modo que quanto à natureza da pesquisa, trata-se de uma pesquisa aplicada porque possui aplicação e utilidade prática aos poderes locais. O estudo analisa como as novas tecnologias de resíduos sólidos podem ser utilizadas para o alcance das cidades inteligentes que podem ser usadas pelo poder público ou pelas empresas para alcançar as cidades sustentáveis.

Sob o ponto de vista de seus objetivos, é caracterizada como descritivo-explicativa. Descritiva porque a pesquisa dessa natureza tem a finalidade de registrar e descrever os fatos observados sem interferir neles (Silva, 2024); e explicativa porque esse tipo de pesquisa procura explicar os porquês das coisas e suas causas, por meio do registro, da análise, da classificação e da interpretação dos fenômenos observados (Silva, 2024). No caso do presente trabalho, a pesquisa buscou: a) descrever as espécies de tecnologias de resíduos sólidos plásticos; e b) analisar como essas tecnologias contribuem para uma cidade inteligente.

Para atingir esse objetivo geral de analisar as tecnologias inovadoras de resíduos sólidos plásticos que podem ser utilizadas para o alcance das cidades inteligentes, foram estabelecidos três objetivos específicos. Quais sejam: i) investigar os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos plásticos no meio ambiente, buscando compreender os desafios e consequências desse problema global; ii) detalhar o conceito e as diferentes concepções de cidades inteligentes, analisando como esse modelo urbano pode contribuir para a sustentabilidade e para uma gestão mais eficiente de resíduos; e iii) levantar e analisar as novas tecnologias inovadoras aplicáveis às cidades inteligentes com foco nas soluções voltadas para a gestão de resíduos plásticos, compreendendo se podem ser aplicadas no Brasil.

Para cumprir com o primeiro objetivo específico de investigar os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos plásticos no meio ambiente, foi realizado um levantamento bibliográfico que permitiu discutir as consequências do descarte inadequado de resíduos gerados pelos bens de produção.

Na segunda etapa, para cumprir com o objetivo específico de detalhar o conceito e as diferentes concepções de cidades inteligentes analisando como esse modelo urbano pode contribuir para a sustentabilidade e para uma gestão mais eficiente de resíduos, foi realizado um levantamento bibliográfico para compreender os conceitos de cidades inteligentes e, ao final, utilizou-se dos eixos trazidos pela pesquisa Urban Systems (2024) para compreender

como as tecnologias levantadas cumpriram com os eixos temáticos na promoção de se caracterizar a tecnologia como promissora para alcançar o status de cidades inteligentes.

Na terceira etapa, para o cumprimento do objetivo específico de levantar e analisar as novas tecnologias inovadoras aplicáveis às cidades inteligentes com foco nas soluções voltadas para a gestão de resíduos plásticos compreendendo se podem ser aplicadas no Brasil, houve a divisão em dois subpontos: o primeiro analisou as tecnologias com base nos eixos temáticos. Observou-se nas pesquisas quantos eixos temáticos as tecnologias levantadas cumprem. Para tanto, dividiu-se em subgrupos de acordo com a quantidade de eixos temático cumpridos: i) as tecnologias que cumpriram 4 ou menos dos 11 eixos; ii) tecnologias que cumpriram com 5 dos 11 eixos; e iii) tecnologias que cumpriram com 6 ou mais eixos. Nesta etapa, foram descritas as tecnologias levantadas e de que maneira elas cumprem com os eixos de cidades inteligentes observados. No segundo subponto, foi observado o custo de implementação dessas tecnologias de acordo com os países em que foram aplicados. De acordo com Cheah *et al.* (2022), o custo de implementação tem relação direta com a qualificação da mão de obra. Isto é, quanto mais qualificada a requisição da tecnologia, mais custosa ela se tornará. Foi realizada uma análise quanto aos custos de implementação das 15 tecnologias, sendo divididas em alto custo, médio custo e baixo custo. Observou-se quantas são aplicadas no Brasil e quantas dessas tecnologias têm potencial para serem aplicadas levando em consideração os critérios analisados na pesquisa.

Os achados do estudo apontam que o Brasil não possui nenhuma tecnologia que se aplique de modo exclusivo, ou seja, toda a tecnologia aplicada no Brasil também se aplica em outros países do mundo. Observou-se também que das 15 tecnologias, o Brasil aplica apenas 3, sendo elas consideradas como tecnologias de baixo custo em razão da mão de obra pouco especializada.

Ademais, observou-se que as tecnologias de baixo e de médio custo, que totalizam 9 tecnologias das 15 elencadas, perfazendo um percentual de 60%, têm potencial de serem aplicadas no Brasil considerando a infraestrutura existente e a necessidade de soluções economicamente viáveis.

Dentre as tecnologias de baixo custo que podem ser aplicadas no Brasil, destacou-se a reciclagem mecânica, amplamente utilizada e passível de expansão com investimentos moderados em equipamentos e capacitação. A inclusão de catadores em sistemas formais também se mostra viável, promovendo impacto social positivo e fortalecendo a economia circular.

Uma das tecnologias viáveis foram os sistemas de coleta inteligente, que utilizam sensores para otimizar rotas e reduzir custos operacionais e podem ser implementados gradualmente.

Além disso, a digestão anaeróbica surge como uma alternativa acessível para o tratamento de resíduos orgânicos, possibilitando a geração de biogás e biofertilizantes. Já a pirólise de plásticos pode ser aplicada em pequena escala para a conversão de resíduos plásticos em combustíveis, reduzindo o descarte inadequado. Essas tecnologias apresentam soluções sustentáveis e economicamente adaptáveis à realidade brasileira, contribuindo para a redução da poluição e para a eficiência na gestão de resíduos.

A seguir, quadro apresentando o resumo das 15 tecnologias levantadas na pesquisa.

**Quadro 3** – Novas tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos plásticos

<b>Tecnologia</b>	<b>Descrição</b>	<b>Benefícios</b>
<b>Pirólise de Plásticos</b>	Processo que converte plásticos em produtos úteis, como óleo, gás e carvão, por meio de decomposição térmica.	Reduz o volume de resíduos plásticos e gera energia a partir de materiais descartados.
<b>Reciclagem Química (Despolimerização)</b>	Método que quebra os plásticos em seus monômeros originais para recriar novos plásticos ou produtos químicos.	Permite a reciclagem de plásticos que são difíceis de reciclar mecanicamente.
<b>Tecnologias de “Resíduos em Energia” (WtE)</b>	Converte resíduos sólidos em energia elétrica ou térmica por meio de processos como incineração ou biogás.	Gera energia a partir de resíduos, contribuindo para a redução de lixo e a produção de energia.
<b>Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal</b>	Formaliza e organiza o trabalho de catadores de resíduos, integrando-os ao sistema de gestão pública de resíduos.	Melhora as condições de trabalho e aumenta a eficiência na coleta e separação de materiais recicláveis.
<b>Economia Circular (Recuperação de Plásticos)</b>	Modelo de produção e consumo que visa minimizar o desperdício e maximizar o uso dos	Reduz a demanda por recursos naturais e diminui a quantidade de plásticos descartados.

	recursos, incluindo a recuperação de plásticos.	
<b>Reciclagem Mecânica</b>	Processo de triturar e fundir plásticos para criar novos produtos, sem alterar sua estrutura química.	É uma solução simples e eficiente para reciclar plásticos comuns, como PET.
<b>Indústria 4.0 e Automação</b>	Aplicação de tecnologias avançadas, como IoT, inteligência artificial e robótica, para automatizar e otimizar processos industriais.	Aumenta a eficiência, reduz custos operacionais e melhora a qualidade da produção.
<b>Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina</b>	Sistemas que utilizam câmeras de alta resolução e sensores ópticos para reconhecer e classificar plásticos com base em características visuais como cor, formato e textura.	Melhora a precisão da classificação, aumenta a pureza dos materiais reciclados, reduz a contaminação e eleva a eficiência da reciclagem.
<b>Tecnologia de Ondas Terahertz</b>	Permite a detecção precisa de materiais plásticos, mesmo em embalagens compostas por diversos polímeros.	Aumenta a reciclagem de materiais considerados difíceis de processar e promove a economia circular.
<b>Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem</b>	Inclui a oxidação genética e química para transformar plásticos em diferentes produtos químicos.	Decompõe plásticos rapidamente, elimina a necessidade de classificação manual e possibilita a reciclagem de plásticos mistos.
<b>Digestão Anaeróbica Avançada</b>	Processo biológico que converte resíduos em biogás.	Produção de energia renovável e redução de resíduos.
<b>Tratamento por Plasma</b>	Decomposição de resíduos plásticos usando plasma de alta energia.	Eliminação completa de resíduos e geração de subprodutos úteis.
<b>Bioengenharia de Enzimas</b>	Uso de enzimas projetadas para degradar plásticos específicos, como PET.	Redução de microplásticos e reciclagem eficiente de materiais plásticos.
<b>Pirólise Híbrida com Micro-ondas</b>	Combina pirólise tradicional com aquecimento por micro-ondas para maior eficiência.	Conversão rápida de plásticos em combustíveis e materiais reutilizáveis.

<b>Recuperação com Solventes</b>	Separação e purificação de plásticos misturados usando solventes químicos específicos.	Reciclagem de alta qualidade e recuperação de materiais com mínimo desperdício.
----------------------------------	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As tecnologias para o tratamento e recuperação de plásticos incluem processos térmicos, químicos, mecânicos e biotecnológicos, cada um com benefícios específicos. Dentre as tecnologias, observou-se eficiências complexas para a reutilização de plásticos como também métodos avançados de aprendizagem como a utilização de inteligência artificial para a maior eficiência de produção. No entanto, observa-se que existem tecnologias menos complexas que utilizam a economia circular no próprio meio de produção capitalista como uma alternativa viável economicamente.

No próximo capítulo, são analisados os aspectos das tecnologias levantadas na metodologia.

## 5 TECNOLOGIAS PARA RESÍDUOS PLÁSTICOS COMO POSSÍVEIS PARA ALCANÇAR O STATUS DE CIDADES INTELIGENTES

Conforme esboçado no capítulo de metodologia, este trabalho levantou 15 tecnologias capazes de auxiliar o alcance de cidades inteligentes. Para melhor compreensão das tecnologias a serem abordadas, o trabalho classificou-as de acordo com os eixos temáticos trazidos pela Urban Systems, que é uma empresa brasileira especializada em estudos e análises sobre cidades. Por sua vez, para melhor compreensão deste capítulo, é necessário relembrar alguns conceitos.

Conforme esboçado anteriormente, as cidades inteligentes, também conhecidas como *smart cities*, são ambientes urbanos que empregam Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) para melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, otimizar serviços públicos e promover a sustentabilidade. Elas se baseiam em eixos como eficiência energética, mobilidade urbana sustentável, gestão inteligente de resíduos e participação cidadã (Harrison; Donnelly, 2011; Caragliu; Del Bo; Nijkamp. 2011; Fernandes, Vasconcelos; Lemos, 2022).

A implementação dessas cidades inteligentes não ocorre apenas pelo poder público, pois envolve também o setor privado, com o governo responsável por políticas públicas, regulamentações e incentivos, enquanto empresas de tecnologia, startups e universidades contribuem com inovações, infraestrutura digital e soluções inteligentes (Harrison; Donnelly, 2011; Caragliu; Del Bo; Nijkamp. 2011; Fernandes, Vasconcelos; Lemos, 2022).

A presente pesquisa utilizou os eixos abordados pela empresa brasileira Urban Systems, especializada em planejamento urbano de desenvolvimento de soluções estratégicas para cidades, empresas e governos (Urban Systems, 2023). Ela realiza estudos e rankings sobre o desenvolvimento urbano sustentável, inovação e infraestrutura no Brasil. Os 11 eixos temáticos do *Ranking Connected Smart Cities*, elaborado pela Urban Systems, abrangem áreas essenciais para o desenvolvimento sustentável e inteligente das cidades. São eles:

- i) Mobilidade, que avalia a infraestrutura de transporte e acessibilidade;
- ii) Urbanismo, relacionado ao planejamento e crescimento ordenado;
- iii) Meio ambiente, focado na gestão sustentável dos recursos naturais;
- iv) Energia, que analisa o uso eficiente e sustentável da matriz energética;
- v) Tecnologia e inovação, voltado para a adoção de soluções digitais e conectividade;
- vi) Governança, que considera a transparência e eficiência da administração pública;
- vii) Economia, avaliando a capacidade de geração de empregos e investimentos;

- viii) Empreendedorismo, que mede o ambiente favorável à criação de novos negócios;
- ix) Educação, analisando a qualidade do ensino e acesso ao conhecimento;
- x) Saúde, que verifica o acesso e a qualidade dos serviços médicos;
- xi) Segurança, que mensura os índices de criminalidade e medidas de proteção pública.

Esses eixos permitem uma visão ampla do nível de desenvolvimento das cidades e de seu potencial para se tornarem mais inteligentes e sustentáveis (Urban Systems, 2023).

O conceito de cidade inteligente envolve a implementação de diversas iniciativas tecnológicas e sustentáveis para aprimorar a qualidade de vida da população. De acordo com a Urban Systems (2023), para que um município seja considerado uma cidade inteligente, ele deve atender a pelo menos 6 dos 11 eixos temáticos apresentados anteriormente.

Desta maneira, como se verá nos subtópicos a seguir, 13,33% das tecnologias levantadas neste trabalho atendem 4 eixos temáticos ou menos, ou seja, são tecnologias que quando aplicadas favorecem ou facilitam o cumprimento significativo de eixos a serem cumpridos pelas cidades para se tornarem cidades inteligentes.

## 5.1 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 4 OU MENOS EIXOS TEMÁTICOS

De 15 tecnologias, 3 atendem a 4 eixos temáticos que foram as tecnologias de Resíduos em Energia (*Waste-to-Energy* - WtE), Ondas Terahertz, Reciclagem Mecânica e a Inclusão de Recolhedores de Resíduos.

A tecnologia Resíduos em Energia refere-se a processos que convertem resíduos sólidos não recicláveis em formas utilizáveis de energia, como eletricidade ou calor. Essas tecnologias incluem incineração, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbica e recuperação de gás de aterro. O método mais comum é a incineração, onde os resíduos são queimados para produzir vapor que aciona turbinas geradoras de eletricidade. Além de reduzir o volume de resíduos destinados a aterros, as tecnologias WtE contribuem para a geração de energia renovável e mitigação de gases de efeito estufa, e também abrangem quatro eixos temáticos relevantes. No aspecto ambiental, essas tecnologias reduzem significativamente a quantidade de resíduos sólidos ao transformá-los em energia. Em tecnologia e inovação, envolvem métodos modernos como incineração e gaseificação, garantindo maior eficiência nos processos. Do ponto de vista econômico, essas tecnologias reduzem os custos com descarte e ainda geram receita por meio da produção de energia. O critério energia também é atendido, uma vez que essas tecnologias

produzem eletricidade e calor a partir da queima de resíduos, otimizando o aproveitamento energético (Cheah *et al.*, 2022).

Já ondas terahertz (THz) são radiações eletromagnéticas situadas na faixa do espectro entre as micro-ondas e o infravermelho distante, aproximadamente entre 0,1 e 10 THz (ou comprimentos de onda entre 3 mm e 30  $\mu\text{m}$ ). Essas ondas possuem características únicas, como a capacidade de penetrar diversos materiais não condutores (plásticos, papel, roupas) sem causar danos, além de serem não ionizantes, o que as torna seguras para aplicações médicas e de segurança.

As ondas THz têm aplicações em diversas áreas, incluindo espectroscopia, comunicações sem fio de altíssima velocidade, imageamento biomédico e segurança, como em scanners para aeroportos e controle de qualidade na indústria. No entanto, o desenvolvimento de tecnologias eficientes para geração e detecção de sinais nessa faixa ainda é um desafio técnico significativo. E também a Tecnologia de Ondas Terahertz está inserida em quatro eixos temáticos principais. No eixo tecnologia e inovação, essa tecnologia permite a análise avançada de materiais e a detecção de contaminantes, ampliando as possibilidades de aplicação na indústria e na pesquisa científica. No critério educação, as ondas terahertz têm sido amplamente utilizadas em estudos acadêmicos e no desenvolvimento de novas técnicas para identificação e caracterização de materiais. Em saúde, essa tecnologia apresenta potencial para exames médicos não invasivos e diagnósticos de alta precisão, contribuindo para avanços na medicina. No eixo segurança, as ondas terahertz são empregadas na detecção de substâncias perigosas e podem ser utilizadas em aeroportos e sistemas de controle de segurança, aumentando a eficiência na identificação de ameaças (Davis; Clark; Cohen, 2020).

A Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal destaca-se em cinco eixos temáticos. No urbanismo, a formalização dos catadores melhora a organização da coleta e do descarte de resíduos nas cidades. Em meio ambiente, essa prática incentiva a reciclagem e reduz a contaminação ambiental. No critério economia, a integração desses trabalhadores gera renda para os catadores e reduz os custos municipais com gestão de resíduos. Em empreendedorismo, a formalização possibilita a criação de cooperativas e novos modelos de negócios voltados à reciclagem. Por fim, no eixo governança, essa prática depende de políticas públicas que garantam direitos e regulamentação adequada do setor (Gisi *et al.*, 2017).

A Reciclagem Mecânica também se destaca dentro dos eixos temáticos analisados. No eixo do meio ambiente, essa tecnologia reduz a necessidade de extração de novos materiais e minimiza o descarte inadequado de resíduos plásticos. Em tecnologia e inovação, envolve processos como trituração, fusão e reúso de polímeros para criar novos produtos reciclados. No

critério econômico, a reciclagem mecânica reduz custos de produção ao reaproveitar materiais descartados e cria novos mercados para insumos reciclados. No empreendedorismo, essa abordagem permite que pequenas e médias empresas atuem na coleta, processamento e comercialização de materiais recicláveis, fomentando a economia local (Silva *et al.*, 2021).

## 5.2 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 5 EIXOS TEMÁTICOS

De 15 tecnologias, 8 atendem a 5 dos 11 eixos temáticos analisados, perfazendo um percentual de 53%. São: Pirólise de Plásticos, Reciclagem Química, Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal, Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem, Digestão Anaeróbica Avançada, Tratamento por Plasma, Pirólise Híbrida com Micro-ondas, e Recuperação de Solventes.

A pirólise de plásticos é um processo térmico que decompõe resíduos plásticos na ausência de oxigênio, convertendo-os em produtos como óleo combustível, gases e carvão, que podem ser reutilizados como fontes de energia ou matéria-prima na indústria. Ela atende 5 dos 11 eixos temáticos analisados. No eixo do meio ambiente, a pirólise contribui para a redução da poluição plástica ao converter resíduos em combustíveis. No critério tecnologia e inovação, esse processo se destaca pelo uso de técnicas térmicas avançadas para a decomposição química dos materiais. A economia também se beneficia, pois a pirólise gera novos produtos e combustíveis, criando oportunidades de mercado. O empreendedorismo é impulsionado pelo desenvolvimento de empresas voltadas para a comercialização de produtos derivados desse processo. Além disso, no critério energia, a pirólise produz óleo combustível, que pode ser utilizado para geração energética (Davis; Clark; Cohen, 2020).

A reciclagem química é um processo que transforma resíduos plásticos em seus componentes químicos originais por meio de reações como pirólise, gaseificação ou dissolução, permitindo a produção de novos materiais ou combustíveis. Ela atende cinco dos onze eixos temáticos, como: o do meio ambiente quando permite a reutilização dos plásticos, evitando aterros sanitários; o eixo da tecnologia e inovação quando utiliza processos químicos avançados para reaproveitamento; economia, reduzindo o custo da matéria-prima e incentiva novos modelos de negócios; energia, dentre os processos da reciclagem, gera subprodutos energéticos; e o quinto eixo do empreendedorismo, que abre espaço para startups e indústrias inovarem em reciclagem.

Os Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem abrangem cinco eixos temáticos principais. No meio ambiente, esses métodos permitem a reciclagem de materiais de difícil

reaproveitamento, reduzindo o impacto ambiental. No eixo tecnologia e inovação, essas técnicas envolvem processos biotecnológicos e químicos avançados para a conversão de resíduos em novos materiais. Do ponto de vista econômico, a aplicação desses métodos reduz custos de produção ao reutilizar materiais, minimizando a dependência de matérias-primas virgens. No empreendedorismo, a implementação dessas tecnologias cria oportunidades para startups e empresas especializadas em soluções inovadoras para reciclagem. Além disso, no eixo energia, alguns desses processos geram subprodutos energéticos que podem ser reaproveitados em diversas aplicações industriais (Kassab *et al.*, 2023).

A Digestão Anaeróbica Avançada se destaca por atender a cinco eixos temáticos essenciais. No meio ambiente, essa tecnologia reduz significativamente a quantidade de resíduos orgânicos descartados e minimiza as emissões de metano, um dos principais gases de efeito estufa. No eixo tecnologia e inovação, os processos biotecnológicos empregados na digestão anaeróbica possibilitam a conversão eficiente de resíduos orgânicos em biogás e fertilizantes. Do ponto de vista econômico, essa solução reduz custos com descarte de resíduos e proporciona uma nova fonte de receita por meio da comercialização dos subprodutos gerados. No empreendedorismo, a adoção dessa tecnologia abre espaço para o desenvolvimento de novas empresas e startups voltadas para a produção e comercialização de biogás. Por fim, no critério energia, a digestão anaeróbica possibilita a geração de biocombustíveis renováveis, promovendo uma alternativa sustentável para a matriz energética (Davis; Clark; Cohen, 2020).

O Tratamento por Plasma abrange cinco eixos temáticos essenciais. No meio ambiente, essa tecnologia se destaca pela capacidade de reduzir resíduos perigosos, tratando-os de maneira eficaz e minimizando a emissão de substâncias tóxicas para o meio ambiente. Em tecnologia e inovação, o uso de plasma permite a decomposição avançada de materiais, com aplicações em diversos setores, como a reciclagem de resíduos plásticos e industriais.

Do ponto de vista econômico, o tratamento plasma reduz os custos de manejo de resíduos e promove a reciclagem de materiais de difícil reaproveitamento, criando novas oportunidades de mercado. No eixo saúde, essa tecnologia é aplicada na esterilização de equipamentos médicos e na destruição de patógenos, garantindo um ambiente mais seguro. No critério energia, o processo de tratamento plasma gera calor, que pode ser reaproveitado para outras aplicações industriais, contribuindo para a eficiência energética (Silva *et al.*, 2021).

A Pirólise Híbrida com Micro-ondas envolve cinco eixos temáticos relevantes. No meio ambiente, essa tecnologia contribui para a reciclagem térmica de resíduos plásticos, reduzindo a quantidade de plástico descartado de maneira inadequada e diminuindo a poluição. Em tecnologia e inovação, utiliza micro-ondas para aumentar a eficiência do processo de pirólise,

uma abordagem inovadora que melhora o rendimento e a qualidade dos produtos gerados. No eixo economia, a pirólise híbrida cria novas oportunidades ao gerar insumos reutilizáveis, que podem ser comercializados como combustíveis ou matérias-primas para diversas indústrias.

Em empreendedorismo, a tecnologia de pirólise híbrida de micro-ondas abre possibilidades de negócios focados na reciclagem avançada de plásticos e na produção de novos materiais, como combustíveis renováveis. Por fim, no eixo energia, a pirólise híbrida com micro-ondas produz combustível renovável a partir de resíduos plásticos, contribuindo para a geração de energia limpa e sustentável (Silva *et al.*, 2021).

A Recuperação com Solventes abrange cinco eixos temáticos principais. No meio ambiente, essa tecnologia auxilia na redução de resíduos plásticos ao permitir a dissolução e o reaproveitamento de plásticos contaminados ou difíceis de reciclar, diminuindo o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses materiais. No eixo tecnologia e inovação, utiliza processos avançados de dissolução e recuperação de plásticos, empregando solventes especializados que aumentam a eficiência do processo de reciclagem.

Do ponto de vista econômico, a Recuperação com Solventes reduz a necessidade de novas matérias-primas, o que pode gerar uma redução nos custos de produção, além de abrir novos mercados para materiais reciclados. Em empreendedorismo, a implementação dessa tecnologia possibilita o surgimento de novas empresas especializadas no desenvolvimento e comercialização de soluções baseadas em solventes para reciclagem de plásticos. Por fim, no eixo energia, alguns dos processos de recuperação com solventes podem gerar subprodutos que podem ser aproveitados como fontes de energia, otimizando o uso dos recursos durante a reciclagem (Davis; Clark; Cohen, 2020).

### 5.3 TECNOLOGIAS QUE CUMPREM COM 6 OU MAIS EIXOS TEMÁTICOS

De 15 tecnologias, 3 atendem a 6 ou mais eixos temáticos: Indústria 4.0 e Automação, a Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina, ambas abrangendo 7 eixos. Além delas, a Economia Circular (Recuperação de Plásticos) e a Bioengenharia de Enzimas também se destacam, atendendo a 6 eixos temáticos. Essas tecnologias demonstram um alto grau de integração e impacto, contribuindo para diversas áreas, como meio ambiente, inovação, economia e governança.

Conforme foi apresentado anteriormente, as cidades que cumprem pelo menos 6 eixos temáticos podem ser caracterizadas como cidades inteligentes (Urban Systems, 2023). Como estas tecnologias aqui apresentadas cumprem com pelo menos 6 ou mais eixos temáticos,

observa-se que, uma vez integradas com a cidade, contribuem significativamente para a caracterização de cidades inteligentes.

A Indústria 4.0 e Automação abrange 7 eixos temáticos principais. No critério mobilidade, contribui para a melhoria da logística e do transporte de resíduos e materiais, otimizando os processos industriais. No urbanismo, contribui com a aplicação de sensores e com a IoT, facilitando o planejamento urbano e a gestão eficiente de recursos. No eixo meio ambiente, a automação e o uso de tecnologia reduzem emissões e desperdícios na produção industrial. Em tecnologia e inovação, a Indústria 4.0 se destaca pelo uso de inteligência artificial, IoT e robótica para otimizar processos produtivos. No critério economia, a digitalização e automação aumentam a produtividade e eficiência, reduzindo custos operacionais. O empreendedorismo também é favorecido, pois novos modelos de negócios podem surgir a partir da inovação tecnológica. Por fim, no eixo energia, a automação possibilita um controle mais eficiente do consumo energético, garantindo maior sustentabilidade (Cheah *et al.*, 2022).

A Economia Circular (Recuperação de Plásticos) se insere em 6 eixos temáticos. No urbanismo, essa abordagem fomenta um sistema mais sustentável de gestão de resíduos. No critério meio ambiente, reduz a extração de recursos naturais e minimiza o descarte de plásticos. No eixo tecnologia e inovação, emprega processos avançados para o reaproveitamento de materiais. Do ponto de vista econômico, a Economia Circular aumenta a eficiência no uso de recursos e reduz desperdícios. No empreendedorismo, esse modelo incentiva novos negócios baseados na reutilização e no reaproveitamento. No eixo governança, políticas públicas podem desempenhar um papel fundamental para estimular a adoção dessa prática e garantir sua eficiência (Davis; Clark; Cohen, 2020).

A Bioengenharia de Enzimas abrange 6 eixos temáticos essenciais. No meio ambiente, essa tecnologia contribui para a biodegradação eficiente de resíduos plásticos e orgânicos, reduzindo o impacto ambiental de materiais não biodegradáveis. Em tecnologia e inovação, a Bioengenharia de Enzimas utiliza engenharia genética para criar enzimas mais eficazes, otimizando o processo de decomposição e reciclagem de resíduos. No eixo economia, a aplicação dessas enzimas reduz os custos de tratamento de resíduos, proporcionando soluções mais acessíveis e eficientes para a reciclagem de materiais. No eixo empreendedorismo, a tecnologia abre oportunidades para o desenvolvimento de startups e empresas focadas na produção e comercialização de enzimas para diversas indústrias, como a de alimentos, farmacêutica e reciclagem. No eixo saúde, a bioengenharia de enzimas tem potencial para aplicações médicas, como no tratamento de doenças e na produção de medicamentos. No eixo

educação, a pesquisa acadêmica sobre enzimas tem se expandido, proporcionando avanços significativos nas ciências biológicas e biotecnológicas (Davis; Clark; Cohen, 2020).

#### 5.4 TECNOLOGIAS DE ACORDO COM A QUANTIDADE DE EIXOS TEMÁTICOS CUMPRIDOS

A análise das tecnologias sustentáveis aplicadas à gestão de resíduos plásticos demonstra que a maioria das soluções desenvolvidas atende a pelo menos 5 dos 11 eixos temáticos analisados. Dentre as tecnologias estudadas, aquelas que abrangem mais de 5 eixos são Indústria 4.0 e Automação, Economia Circular (Recuperação de Plásticos), Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina e Bioengenharia de Enzimas. O eixo mais atendido por essas tecnologias é o de Tecnologia e Inovação, o que evidencia a centralidade da digitalização, automação e biotecnologia na modernização dos processos industriais e ambientais (Cheah *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021).

8 tecnologias atenderam exatamente a 5 eixos e equivalem a 72% das tecnologias apresentadas neste trabalho que cumprem pelo menos 5 dos 11 eixos temáticos. A título de exemplo, tem-se a Pirólise de Plásticos, Reciclagem Química, Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal, Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem, Digestão Anaeróbica Avançada, Pirólise Híbrida com Micro-ondas e Recuperação com Solventes.

As tecnologias que atendem a pelo menos 4 eixos temáticos são 2 tecnologias que perfazem um percentual de 13,33% com relação ao total das 15, sendo elas: Resíduos em Energia (WtE), Tecnologia de Ondas Terahertz. O eixo comum dentre elas foi o da Tecnologia e Inovação, demonstrando que, embora não cumpram com tantos eixos quanto as anteriores, essas soluções possuem um impacto relevante na modernização da gestão de resíduos e na eficiência dos processos industriais. A recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos, por exemplo, tem sido uma solução cada vez mais adotada por países que buscam reduzir a dependência de aterros sanitários e aumentar a geração de energia renovável (Kassab *et al.*, 2023).

O eixo mais contemplado por todas as 15 tecnologias levantadas é a do Meio Ambiente, sendo cumpridas por 100% das tecnologias estudadas. Foi evidenciado que essas soluções desempenham um papel fundamental na redução da poluição, reaproveitamento de resíduos e mitigação dos impactos ambientais. Essas tecnologias mostram que há um equilíbrio entre a inovação e a sustentabilidade, uma vez que grande parte delas converte resíduos em novos produtos e fontes de energia (Davis; Clark; Cohen, 2020; Gisi *et al.*, 2017).

É relevante destacar que nenhuma das tecnologias analisadas se enquadrou nas categorias de três ou menos eixos temáticos, o que reforça a integração das soluções estudadas. Isso indica que as inovações voltadas à gestão sustentável de resíduos plásticos não se limitam a impactos isolados, mas apresentam um caráter multidimensional, contribuindo simultaneamente para a economia, o meio ambiente, a governança e a inovação tecnológica.

Diante desses achados, observa-se que as tecnologias sustentáveis mais eficazes são aquelas que promovem um equilíbrio entre inovação e impacto ambiental. Além disso, a alta representatividade dos eixos Tecnologia e Inovação e Meio Ambiente nas soluções estudadas reforça a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento.

De acordo com Harrison e Donnelly (2011), as cidades inteligentes devem integrar diferentes dimensões, incluindo governança, tecnologia e qualidade de vida, o que converge com os resultados obtidos nesta análise. Da mesma forma, Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011) destacam que a inovação e a sustentabilidade são essenciais para o desenvolvimento de cidades mais resilientes e eficientes. Portanto, a implementação dessas tecnologias deve ser acompanhada por políticas públicas eficazes e incentivos econômicos que garantam sua ampla adoção e escalabilidade, promovendo a sustentabilidade alinhada com os princípios do desenvolvimento inteligente.

Como apontam Harrison e Donnelly (2011) e Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011), o desenvolvimento urbano moderno precisa equilibrar inovação tecnológica, inclusão social e preservação ambiental para alcançar um crescimento sustentável. A ampliação do uso dessas tecnologias e a colaboração entre governos, indústrias e sociedade civil objetivam o cumprimento de metas ambientais no setor econômico, promovendo cidades mais resilientes e sustentáveis para as futuras gerações.

A seguir, quadro com resumo das tecnologias levantadas e os respectivos cumprimentos quanto aos eixos temáticos abordados.

**Quadro 4** – Resumo das tecnologias levantadas e os cumprimentos quanto aos eixos temáticos relativos a uma cidade inteligente

<b>Tecnologias</b>	<b>Eixos temáticos</b>	<b>Eixos mais cumpridos</b>
<b>Pirólise de Plásticos</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Reciclagem Química</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Resíduos em Energia (WtE)</b>	4	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Energia.

<b>Indústria 4.0 e Automação</b>	7	Mobilidade, Urbanismo, Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina</b>	5	Mobilidade, Urbanismo, Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia.
<b>Ondas Terahertz</b>	4	Tecnologia e Inovação, Educação, Saúde, Segurança.
<b>Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Digestão Anaeróbica Avançada</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Tratamento por Plasma</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Saúde, Energia.
<b>Bioengenharia de Enzimas</b>	6	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Saúde, Educação.
<b>Pirólise Híbrida com Micro-ondas</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Recuperação com Solventes</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>Reciclagem Mecânica</b>	5	Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Energia.
<b>A Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal</b>	6	Meio ambiente, Empreendedorismo, Economia, Governança, Tecnologia e inovação, Educação.
<b>Economia Circular (Recuperação de Plásticos)</b>	6	Urbanismo, Meio Ambiente, Tecnologia e Inovação, Economia, Empreendedorismo, Governança.

Fonte: Elaborado: pelo autor com base na Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

Tecnologias como a Indústria 4.0 e Automação se destacam por atender a um maior número de eixos (7), mostrando um impacto abrangente em várias áreas, enquanto outras, como a Recuperação com Solventes e Pirólise Híbrida com Micro-ondas, atendem a 5 eixos temáticos. A análise desses dados pode fornecer ideias sobre como as diferentes tecnologias se distribuem em relação ao impacto que geram em áreas como meio ambiente, economia e inovação.

## 5.5 TECNOLOGIAS QUE ABORDAM SOBRE O EIXO DO MEIO AMBIENTE

De modo geral, o eixo temático mais presente nas tecnologias analisadas foi o de Meio Ambiente, pois todas as tecnologias têm como objetivo reduzir os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos plásticos. Isso demonstra uma forte preocupação das iniciativas com a sustentabilidade e a mitigação dos danos ao ecossistema.

Além disso, outros eixos bastante recorrentes foram Tecnologia e Inovação e Economia. Muitas tecnologias envolvem processos inovadores para reaproveitamento e tratamento de resíduos, além de impulsionarem cadeias produtivas e novos modelos de negócios, seja por meio da reciclagem, da valorização energética ou da inclusão socioeconômica.

Ao analisar cada tecnologia individualmente, percebe-se que algumas se destacam por atender a um maior número de eixos. Tecnologias como a Pirólise de Plástico e a Reciclagem Química cobrem uma gama mais ampla de eixos, pois, além do impacto ambiental positivo, promovem avanços tecnológicos e movimentam setores industriais.

Por outro lado, tecnologias de menor custo e implementação mais simples tendem a estar mais restritas a um número menor de eixos, geralmente vinculados ao Meio Ambiente e à Economia, sem necessariamente impactar políticas públicas ou inovação tecnológica.

Outro ponto relevante é a Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal, que atende a 6 eixos, evidenciando sua importância tanto ambiental quanto social e econômica. Esse tipo de tecnologia não apenas melhora a destinação dos resíduos, mas também promove equidade social e inclusão produtiva.

A análise dos eixos temáticos das tecnologias evidencia que a sustentabilidade ambiental continua sendo a prioridade na gestão de resíduos sólidos plásticos, mas há um crescimento significativo na interseção com inovação tecnológica e desenvolvimento econômico. Tecnologias que conseguem abranger um maior número de eixos apresentam potencial para maior impacto positivo nas cidades, pois conciliam múltiplos benefícios, desde redução de danos ambientais até oportunidades de emprego e renda.

As tecnologias analisadas desempenham um papel fundamental no manejo adequado dos resíduos sólidos, promovendo a destinação correta e minimizando impactos ambientais. Soluções como a reciclagem mecânica, química e a pirólise evitam o acúmulo de resíduos em aterros e no meio ambiente, reduzindo a poluição e incentivando a economia circular. Além disso, tecnologias como a pirólise e a reciclagem química permitem a valorização dos resíduos ao transformá-los em novos produtos e insumos industriais, diminuindo a dependência de matérias-primas virgens e os impactos da extração de recursos naturais.

Outro aspecto relevante é a inclusão social e a eficiência na gestão pública, como ocorre na formalização de catadores, que melhora a coleta seletiva e gera renda para trabalhadores. Além disso, métodos avançados de separação e tratamento reduzem custos operacionais e prolongam a vida útil dos aterros sanitários. No geral, essas tecnologias são essenciais para minimizar os impactos ambientais, reduzindo a contaminação do solo e da água, além de contribuir para a redução de gases de efeito estufa, tornando a gestão de resíduos mais sustentável e eficiente.

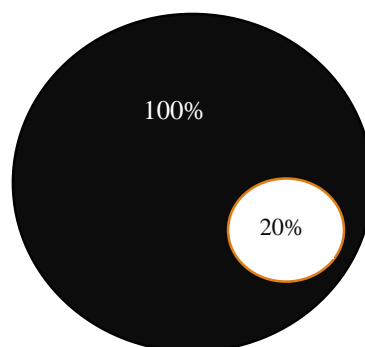
Após analisar os cumprimentos dos eixos temáticos trazidos, a presente pesquisa examina as tecnologias com base no seu custo de implementação, bem como quantas das tecnologias pesquisadas são aplicadas fora do Brasil e neste país.

## 5.6 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS COM BASE EM SEU CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO

As tecnologias levantadas foram divididas com base nos países que aplicam tecnologias capazes de transformar uma cidade em cidade inteligente. Dentre as 15 tecnologias levantadas no presente trabalho, 12 delas são aplicadas exclusivamente em países estrangeiros como, por exemplo: Singapura, Índia, Alemanha, dentre outros países.

Foi notado que dentre as 15 tecnologias levantadas, 3 delas é aplicada no Brasil, perfazendo um percentual de 20% sobre o total. Observa-se também que das 15 tecnologias levantadas, 100% delas são aplicadas no exterior, ou seja, não há nenhuma tecnologia relativa ao manejo adequado dos resíduos sólidos plásticos aplicados exclusivamente pelo Brasil.

**Gráfico 1** – Análise Percentual das 15 Tecnologias de Resíduos Sólidos Plásticos Levantados na Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que não há ainda nenhuma tecnologia aplicada exclusivamente no Brasil. Todas as tecnologias aqui aplicadas também são aplicadas no exterior. Para se observar se as tecnologias aqui no Brasil aplicadas são de alto, médio ou baixo custo de implementação, foram analisadas as 15 tecnologias.

O critério de alto, médio ou baixo custo de aplicação das tecnologias estudadas foi interpretado com base no custo de implementação. Nas pesquisas levantadas, os custos de implementação estavam diretamente ligados à qualificação da mão de obra, uma vez que tecnologias mais avançadas demandam profissionais especializados para operação e manutenção. Estudos como os de Cheah *et al.* (2022) e Reis, Barreto e Capelari (2023) destacam que a digitalização e automação dos processos de gestão de resíduos exigem investimentos tanto em infraestrutura quanto na capacitação técnica, o que influencia diretamente o custo final da implementação.

As tecnologias de baixo custo, como a Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal e a Economia Circular (Recuperação de Plásticos), se destacam por sua viabilidade de implementação, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde há demandas urgentes por soluções sustentáveis e inclusão social (Gisi *et al.*, 2017; Davis; Clark; Cohen, 2020; Kassab *et al.*, 2023).

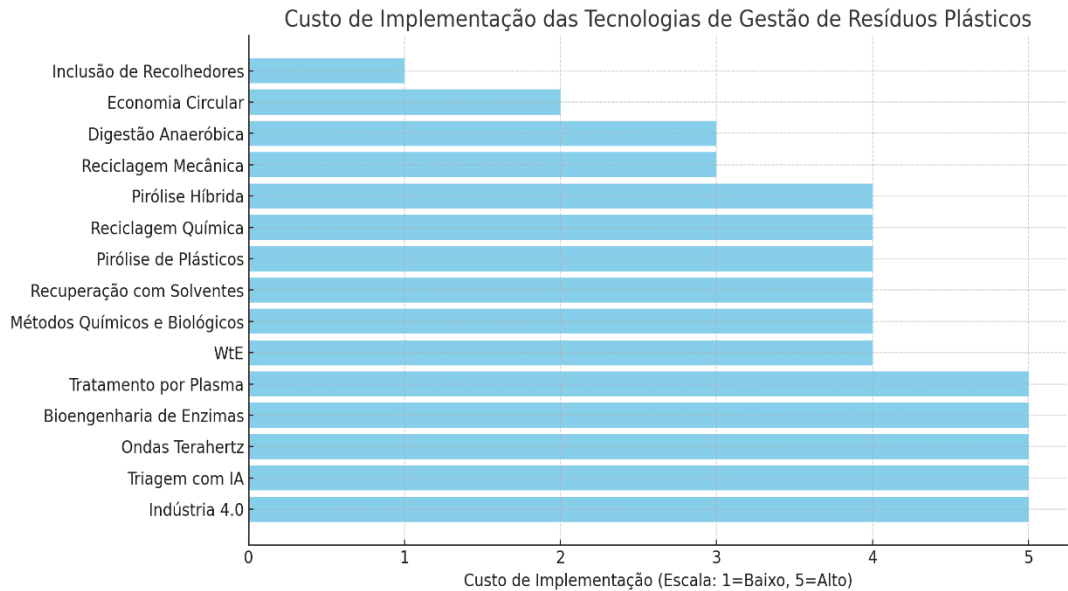
No entanto, tecnologias de alto custo, como a Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina; a Indústria 4.0 e Automação; e a Bioengenharia de Enzimas, exigem altos investimentos e infraestrutura avançada, o que as tornam mais comuns em países desenvolvidos (Cheah *et al.*, 2022; O'connor; Foster.; Baker, 2021). Essas tecnologias têm grande potencial para otimizar a gestão de resíduos, mas sua aplicação em larga escala depende de incentivos financeiros e avanços na capacitação da mão de obra.

Além disso, tecnologias de médio custo, como a Digestão Anaeróbica Avançada e a Reciclagem Mecânica, ocupam um espaço intermediário no ranking, sendo aplicáveis tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento, desde que haja apoio governamental e políticas públicas adequadas de investimento e priorização dessas políticas (Fernando *et al.*, 2019; Kim; Cho; Ryu, 2022). Essas soluções permitem a conversão de resíduos em produtos reutilizáveis e em potenciais energéticos, tornando-se uma alternativa viável econômico, social e ambiental para melhorar a sustentabilidade.

Dessa forma, a aplicação das tecnologias com base no custo de implementação reflete tanto a capacidade econômica dos países quanto seu nível de inovação tecnológica e políticas ambientais. No Brasil, o avanço na implementação de tecnologias de baixo e médio custo pode

contribuir significativamente para a redução de impactos ambientais e o desenvolvimento sustentável, enquanto os investimentos em tecnologias mais avançadas podem ser ampliados com parcerias estratégicas entre setor público e privado.

**Gráfico 2** - Análise Comparativa de Custo nas Soluções Tecnológicas para Gestão de Resíduo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Acima temos um gráfico de barras com os custos de implementação das tecnologias de gestão de resíduos plásticos. A escala usada varia de 1 (baixo custo) a 5 (alto custo).

A seguir, serão abordadas as tecnologias com maior custo de implementação, as de médio custo e as de alto custo, compreendendo porque são assim classificadas.

### 5.6.1 Tecnologias com maior custo de implementação

Nas pesquisas levantadas, os custos de implementação estão diretamente ligados à qualificação da mão de obra, ou seja, quanto mais qualificada a mão de obra, maior o custo de implementação, uma vez que necessitada de orçamentos mais altos para qualificar a mão de obra no manuseio e na manutenção dessas tecnologias (Reis; Barreto; Capelari, 2023).

Dentre as 15 tecnologias analisadas, 5 são classificadas como de alto custo de implementação, representando aproximadamente 33% do total. Essas tecnologias são a Indústria 4.0 e Automação, a Triagem Avançada com IA e Aprendizado de Máquina, Tecnologia de Ondas Terahertz e Tratamento por Plasma. As tecnologias com maior custo de implementação atendem 6 ou mais eixos temáticos trazidos na pesquisa Urban Systems (2023), com exceção da tecnologia de Ondas Terahertz, que atende somente a 4 eixos temáticos. O alto

custo está diretamente relacionado à necessidade de infraestrutura robusta, sistemas integrados e mão de obra altamente qualificada para operar e manter os equipamentos inteligentes (Cheah *et al.*, 2022).

A Indústria 4.0, por exemplo, exige investimentos significativos em sensores inteligentes, robótica, Internet das Coisas e Inteligência Artificial (IA) para otimizar a triagem e reciclagem de materiais. No setor de resíduos plásticos, sua aplicação envolve robôs automatizados capazes de identificar e separar diferentes tipos de polímeros com alta precisão, aumentando a taxa de reciclagem e reduzindo desperdícios (Cheah *et al.*, 2022). Apesar do custo inicial elevado, os benefícios a longo prazo incluem maior eficiência produtiva, redução de custos operacionais e impacto ambiental positivo, fortalecendo a economia circular e a sustentabilidade do setor (Kassab *et al.*, 2023).

Nas pesquisas levantadas, os custos de implementação dessas tecnologias estão diretamente ligados à qualificação da mão de obra. Quanto maior o nível de especialização exigido, maior é o investimento necessário para treinamento e manutenção, tornando-se uma barreira para países com menor disponibilidade de profissionais qualificados na área (Davis; Clark; Cohen, 2020). Assim, a implementação dessas inovações, embora altamente benéfica, é desafiada por fatores financeiros e estruturais, o que pode explicar a menor adesão em determinadas regiões, como o Brasil.

Um exemplo prático da aplicação da Indústria 4.0 na gestão de resíduos pode ser observado na implantação de sistemas automatizados de triagem de materiais recicláveis na Noruega. Nesse país, sensores ópticos e inteligência artificial são utilizados em centrais de reciclagem para identificar, separar e classificar diferentes tipos de plásticos com extrema precisão, reduzindo a contaminação dos materiais reciclados e aumentando sua reutilização na cadeia produtiva. Esses sistemas são integrados a redes de dados que permitem monitoramento remoto e ajustes em tempo real, garantindo maior eficiência e redução de desperdícios (Cheah *et al.*, 2022).

Apesar dos elevados custos de implementação, esses avanços tecnológicos trazem benefícios significativos a longo prazo, como a redução de custos operacionais, aumento da eficiência na triagem e reciclagem e impacto ambiental positivo. Esse modelo já é adotado por grandes empresas do setor, como a Tomra Systems, que é uma empresa norueguesa especializada em tecnologias de reciclagem e separação de resíduos, a qual desenvolveu tecnologias de separação baseadas em espectroscopia de infravermelho para maximizar a recuperação de resíduos plásticos (Kassab *et al.*, 2023). Essas inovações demonstram como a

tecnologia da Indústria 4.0 pode revolucionar a reciclagem tornando-a mais eficiente e sustentável.

No contexto da gestão de resíduos plásticos, o custo de implementação da Indústria 4.0 é elevado devido a diversos fatores estruturais e operacionais. Primeiramente, a necessidade de infraestrutura tecnológica avançada, como sensores inteligentes, sistemas de automação e redes integradas de dados, exige investimentos iniciais substanciais (Cheah *et al.*, 2022). Além disso, a adoção dessas tecnologias demanda mão de obra altamente qualificada, o que eleva os custos com treinamento e especialização de profissionais capazes de operar e manter os sistemas inteligentes de reciclagem (Kassab *et al.*, 2023).

Outro fator relevante é o custo de desenvolvimento e manutenção de softwares de inteligência artificial e aprendizado de máquina, essenciais para a triagem automatizada e o gerenciamento eficiente dos resíduos. Além disso, a integração desses sistemas às cadeias produtivas existentes requer adaptações nas indústrias, o que pode gerar um custo adicional considerável.

Apesar do investimento inicial elevado, essas tecnologias proporcionam redução de custos operacionais a longo prazo, maior eficiência nos processos de separação de materiais e diminuição do desperdício na reciclagem, tornando o setor mais sustentável e economicamente viável (Cheah *et al.*, 2022).

No que se refere à aplicação, no Brasil, apenas uma dessas tecnologias de alto custo foi implementada de forma significativa, principalmente em projetos-piloto e iniciativas específicas em grandes centros urbanos, como São Paulo e Curitiba, onde incentivos governamentais e parcerias privadas viabilizaram sua adoção (Davis; Clark; Cohen, 2020). Já no exterior, essas tecnologias têm uma implementação mais ampla, especialmente em países desenvolvidos da Europa e na Ásia, onde políticas ambientais e investimentos em inovação favorecem a aplicação de soluções mais avançadas para a gestão de resíduos (Kassab *et al.*, 2023).

As ondas Terahertz (THz) referem-se a radiações eletromagnéticas na faixa entre micro-ondas e infravermelho, com frequências entre 0,1 e 10 THz. Elas são utilizadas para a identificação de materiais sem contato físico, podendo penetrar diversos compostos não condutores, como plásticos e cerâmicas. Essa tecnologia é promissora na triagem automatizada de resíduos plásticos, permitindo a separação eficiente de diferentes polímeros sem a necessidade de processos químicos agressivos, a exemplo da empresa TeraSense, da Califórnia, EUA, que desenvolveu sistemas de inspeção baseados em ondas THz para a detecção e

separação de plásticos em resíduos sólidos urbanos, contribuindo para um melhor reaproveitamento de materiais recicláveis (TeraSense, 2022).

O tratamento por plasma consiste no uso de plasma (gás ionizado a altas temperaturas) para decompor materiais complexos. No contexto dos resíduos plásticos, essa tecnologia permite a pirólise avançada de plásticos, transformando-os em gases como monóxido de carbono, hidrogênio e metano, que podem ser reaproveitados como fontes de energia ou para a síntese de novos materiais, a exemplo do projeto PlasmaPyro, na Alemanha, que utiliza plasma térmico para converter resíduos plásticos mistos em syngas (gás de síntese), que pode ser utilizado para a produção de combustíveis limpos e hidrogênio verde (Müller; Schmidt; Becker, 2021).

O tratamento por plasma utiliza temperaturas extremamente altas para decompor resíduos perigosos e plásticos, reduzindo sua toxicidade e volume. O custo de implementação é médio porque a tecnologia exige reatores de plasma e sistemas de segurança avançados para evitar riscos operacionais. Contudo, esse método pode ser economicamente viável em longo prazo, pois reduz significativamente a necessidade de aterros sanitários e pode gerar subprodutos úteis (Davis; Clark; Cohen, 2020).

#### 5.6.2 Tecnologias com médio custo de implementação

Dentre as 15 tecnologias analisadas, 9 são classificadas como de médio custo de implementação, representando aproximadamente 60% do total. São elas a Pirólise Híbrida com Micro-ondas, Tecnologias de Resíduos em Energia, Reciclagem Química (Despolimerização), Pirólise de Plásticos, Recuperação com Solventes, Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem, Economia Circular (Recuperação de Plásticos), Digestão Anaeróbica Avançada e Reciclagem Mecânica.

A implementação de tecnologias voltadas para a gestão de resíduos e sustentabilidade envolve diferentes níveis de investimento, sendo que aquelas de médio custo representam uma alternativa viável entre soluções de alto investimento e métodos mais simples. Essas tecnologias equilibram inovação e viabilidade financeira, permitindo maior acessibilidade para setores públicos e privados.

A reciclagem química é um processo que permite a reutilização de plásticos complexos por meio da quebra de suas cadeias poliméricas, transformando-os em matérias-primas utilizáveis novamente. O custo de implementação é considerado médio devido à necessidade de infraestrutura especializada e reatores químicos avançados. Embora seja mais acessível do

que métodos de alta complexidade, ainda requer investimentos significativos em pesquisa e adaptação tecnológica para diferentes tipos de plásticos. Além disso, a disponibilidade de catalisadores eficientes pode influenciar os custos operacionais (Kassab *et al.*, 2023).

Já a Tecnologia de Resíduos em Energia transforma resíduos sólidos em energia por meio de processos como incineração e gaseificação. O custo é médio porque a implementação exige usinas específicas e sistemas de controle ambiental rigorosos para evitar emissões tóxicas. No entanto, comparado a tecnologias mais avançadas, o retorno financeiro pela geração de eletricidade e calor pode compensar parte do investimento inicial ao longo do tempo. Em países como Alemanha e Japão, a tecnologia é amplamente utilizada devido à sua viabilidade econômica e contribuição para a matriz energética sustentável (Cheah *et al.*, 2022).

A reciclagem mecânica envolve processos como trituração, fusão e reúso de polímeros para fabricar novos produtos. O custo de implementação é considerado médio, pois, embora exija infraestrutura específica, como máquinas de moagem e extrusão, esses equipamentos são mais acessíveis do que sistemas químicos ou biotecnológicos. Além disso, a dependência da triagem eficiente dos resíduos plásticos pode influenciar a viabilidade da reciclagem mecânica em diferentes locais (Silva *et al.*, 2021).

Os Métodos Químicos e Biológicos para Reciclagem utilizam processos químicos ou biológicos, como enzimas e microrganismos, para decompor resíduos plásticos e convertê-los em novos materiais. O custo de implementação é médio devido à necessidade de pesquisa para aprimorar a eficiência das reações e à infraestrutura laboratorial para escalonamento dos processos. No entanto, esses métodos têm o potencial de se tornarem mais acessíveis à medida que a biotecnologia avança, reduzindo a necessidade de equipamentos altamente especializados (Kassab *et al.*, 2023).

A pirólise híbrida com micro-ondas é uma variação da pirólise convencional que utiliza radiação eletromagnética para acelerar a decomposição de plásticos e gerar combustíveis. O custo de implementação é médio porque requer equipamentos especializados e uma fonte estável de resíduos plásticos para manter a eficiência do processo. Entretanto, essa tecnologia tem se mostrado promissora na conversão de plásticos não recicláveis em produtos de valor agregado, como óleos sintéticos e gases combustíveis (Cheah *et al.*, 2022).

A Digestão Anaeróbica Avançada (DAA) é uma tecnologia que aprimora o processo tradicional de digestão anaeróbica, no qual microrganismos decompõem matéria orgânica em um ambiente sem oxigênio, produzindo biogás (composto principalmente por metano e dióxido de carbono) e biofertilizantes. A versão avançada desse processo incorpora pré-tratamentos

térmicos, químicos ou ultrassônicos para aumentar a eficiência da conversão da matéria orgânica em biogás, melhorando o rendimento energético e reduzindo o tempo de processamento. A empresa Anaergia desenvolveu sistemas de digestão anaeróbica avançada que utilizam hidrólise térmica para aumentar a produção de biogás em estações de tratamento de esgoto e resíduos orgânicos urbanos, permitindo maior eficiência energética e menor geração de resíduos finais (Anaergia, 2023).

Essas tecnologias apresentam desafios e vantagens específicas, e seu custo de implementação depende de fatores como disponibilidade de infraestrutura, qualificação da mão de obra e políticas de incentivo à inovação.

### 5.6.3 Tecnologias com menor custo de implementação

Dentre as 15 tecnologias analisadas, 3 são classificadas como de menor custo de implementação, representando aproximadamente 20% do total. Essas tecnologias são a reciclagem mecânica, economia circular e inclusão de recolhedores de resíduos no sistema formal. O baixo custo está relacionado à necessidade de uma infraestrutura simplificada, com sistemas menos complexos e uma mão de obra com qualificação básica para operar e realizar a manutenção dos equipamentos, reduzindo assim os investimentos necessários (Cheah *et al.*, 2022).

As tecnologias de menor custo de implementação desempenham um papel crucial na gestão sustentável de resíduos, especialmente em regiões com recursos financeiros limitados. Essas soluções geralmente exigem investimentos iniciais reduzidos e utilizam processos acessíveis, permitindo uma implementação mais ampla tanto pelo setor público quanto pelo privado.

A inclusão de recolhedores de resíduos no sistema formal é uma tecnologia de baixo custo de implementação, pois não exige investimentos significativos em infraestrutura ou equipamentos avançados. Diferentemente de processos industriais complexos, essa estratégia se baseia principalmente na organização do trabalho, na criação de cooperativas e no apoio institucional, fatores que demandam menos recursos financeiros.

Segundo Gisi *et al.* (2017), a formalização dos catadores pode ser feita por meio de políticas públicas, incentivos governamentais e parcerias com empresas privadas, reduzindo a necessidade de altos investimentos iniciais. Além disso, a capacitação dos trabalhadores e a regulamentação do setor têm custos relativamente baixos quando comparados a tecnologias que requerem equipamentos sofisticados e qualificação técnica avançada.

Outro fator que contribui para o baixo custo é que a infraestrutura básica já existe em muitos municípios, como galpões de triagem e sistemas de coleta seletiva. Dessa forma, a principal necessidade é a melhoria da organização e eficiência operacional, em vez da criação de novas instalações ou aquisição de maquinário caro.

Além de sua viabilidade econômica, essa abordagem gera impactos positivos ao aumentar a taxa de reciclagem e reduzir os custos municipais com a gestão de resíduos, tornando-se uma solução sustentável tanto do ponto de vista ambiental quanto financeiro.

Além dos benefícios sociais, a inserção dos catadores no sistema formal contribui para a eficiência da economia circular, um modelo que busca minimizar o desperdício e manter os materiais em uso pelo maior tempo possível. Quando estruturado corretamente, esse sistema reduz a dependência de matérias-primas virgens e melhora a qualidade da reciclagem, uma vez que os resíduos são coletados e triados de maneira mais criteriosa. Estudos apontam que políticas públicas voltadas à organização de cooperativas de reciclagem e incentivos fiscais para a formalização são estratégias eficazes para consolidar esse modelo (Gisi *et al.*, 2017). Com um investimento estimado de até R\$ 10 milhões, essa iniciativa apresenta um custo relativamente baixo, mas um alto impacto socioambiental.

Por sua vez, a economia circular na recuperação de plásticos busca reduzir, reutilizar e reciclar materiais plásticos ao longo de todo o seu ciclo de vida, minimizando impactos ambientais e promovendo um consumo mais sustentável. Segundo Davis, Clark e Cohen (2020) e Kassab *et al.* (2023), estratégias eficazes incluem a adoção de embalagens recicláveis, o desenvolvimento de novos métodos de reprocessamento de polímeros e a criação de incentivos para indústrias utilizarem plástico reciclado em seus produtos. Essa abordagem visa fechar o ciclo dos materiais, evitando que resíduos plásticos se acumulem em aterros sanitários ou no meio ambiente.

A economia circular na recuperação de plásticos é considerada uma tecnologia de médio-baixo custo porque se baseia na otimização de recursos já existentes e na reutilização de materiais, reduzindo a necessidade de investimentos elevados em novas infraestruturas ou processos industriais complexos. Diferente de métodos mais sofisticados, como a reciclagem química ou a pirólise, que exigem equipamentos avançados e alto consumo energético, a economia circular prioriza práticas acessíveis como a reciclagem mecânica, a reutilização de polímeros e a adaptação de processos produtivos para incorporar materiais reciclados.

Segundo Davis, Clark e Cohen (2020) e Kassab *et al.* (2023), a implementação da economia circular pode ser feita por meio de políticas públicas e incentivos financeiros, o que reduz custos para as indústrias. Além disso, empresas e cooperativas podem adotar esse modelo

com investimentos relativamente baixos, aproveitando estruturas já existentes para triagem, processamento e reaproveitamento de plásticos.

Outro fator que contribui para o baixo custo é a valorização de resíduos como insumos, transformando o descarte em uma nova fonte de matéria-prima sem a necessidade de grandes adaptações tecnológicas. Dessa forma, além de reduzir a poluição, essa abordagem gera benefícios econômicos ao diminuir gastos com matéria-prima virgem e estimular um mercado mais sustentável.

A implementação da economia circular para plásticos requer investimentos tecnológicos e mudanças estruturais no setor produtivo, incluindo melhorias nos processos de triagem e reciclagem, além de incentivos ao ecodesign. No Brasil, essa transformação enfrenta desafios como falta de infraestrutura adequada e resistência de algumas indústrias em substituir materiais convencionais por reciclados (Davis; Clark; Cohen, 2020).

No entanto, o custo de implementação, estimado em até R\$ 20 milhões, é considerado baixo-médio, sendo uma alternativa viável para governos e empresas comprometidos com a sustentabilidade. Com políticas públicas eficazes e participação do setor privado, a economia circular tem o potencial de reduzir significativamente o impacto ambiental dos plásticos e impulsionar a inovação sustentável na indústria.

## 5.7 CONTRIBUIÇÕES DAS TECNOLOGIAS APRESENTADAS E A ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE SEREM APLICADAS NO BRASIL

No contexto brasileiro, as tecnologias mais viáveis são aquelas de baixo e médio custo, considerando as restrições de investimento público e privado, além da necessidade de qualificação da mão de obra. Entre elas, destacam-se a Inclusão de Recolhedores de Resíduos no Sistema Formal e a Economia Circular (Recuperação de Plásticos), que já demonstraram potencial para aprimorar a gestão de resíduos no país (Gisi *et al.*, 2017; Davis; Clark; Cohen, 2020; Kassab *et al.*, 2023).

Dentre as tecnologias mencionadas, algumas se sobressaem por sua viabilidade técnica, econômica e social. A seguir, discute-se aquelas que apresentam o melhor custo-benefício, considerando desafios e oportunidades no Brasil.

A reciclagem mecânica é amplamente reconhecida como uma das soluções mais acessíveis, tanto em custo quanto em infraestrutura. No Brasil, grandes volumes de plásticos rígidos são reciclados em cooperativas que utilizam processos mecânicos básicos, alinhando-se às demandas do mercado (Gisi *et al.*, 2017). No entanto, a eficiência dessa tecnologia depende

da qualidade dos resíduos segregados, um desafio devido à falta de políticas robustas de coleta seletiva. Ainda assim, essa abordagem tem alto impacto social, empregando milhares de trabalhadores em cooperativas de catadores (Gisi *et al.*, 2017).

A implementação dessas soluções exige maior envolvimento do setor privado e campanhas de conscientização para ampliar a participação da sociedade. A transição para uma economia circular depende de políticas públicas integradas e da colaboração entre diferentes atores da cadeia produtiva (Hartley *et al.*, 2023).

Embora a adoção de tecnologias *Waste-to-Energy* envolva custos elevados, elas podem ser alternativas viáveis para grandes centros urbanos brasileiros, onde a geração de resíduos supera a capacidade dos aterros sanitários. Essas tecnologias oferecem uma solução eficiente para áreas metropolitanas com infraestrutura avançada (Xevgenos *et al.*, 2015). No entanto, desafios incluem investimentos iniciais elevados e resistência social devido a preocupações ambientais, como emissões atmosféricas. Ainda assim, cidades como São Paulo e Rio de Janeiro poderiam implementar plantas-piloto para avaliar sua viabilidade e aceitação pública (Sachs, 2002).

Além dessas, outras tecnologias de médio custo, como a Digestão Anaeróbica Avançada e a Reciclagem Mecânica Avançada, poderiam ser aplicadas no Brasil com investimentos adequados. A Digestão Anaeróbica permite o tratamento de resíduos orgânicos para produção de biogás e fertilizantes, sendo uma solução sustentável para municípios que buscam alternativas ao descarte convencional (Fernando *et al.*, 2019). Já a Reciclagem Mecânica Avançada, que inclui processos de separação automatizada, pode aumentar a eficiência da reciclagem e reduzir a contaminação dos materiais processados (Kim; Cho; Ryu, 2022).

A aplicação de tecnologias emergentes, como sistemas de triagem com Inteligência Artificial, pode melhorar a separação dos resíduos plásticos, aumentando a pureza dos materiais reciclados. Esses sistemas, equipados com câmeras de alta resolução e sensores ópticos, identificam e classificam plásticos por cor, formato e textura, tornando a reciclagem mais eficiente (Recycling Inside, 2022).

Outra inovação promissora é a reciclagem química, que inclui processos como a despolimerização e a pirólise, capazes de transformar plásticos descartados em matérias-primas reutilizáveis ou combustíveis. A despolimerização quebra os polímeros em monômeros, permitindo a produção de novos plásticos de alta qualidade, enquanto a pirólise converte resíduos plásticos em óleo, gás e carvão, sendo uma solução para materiais não recicláveis por métodos mecânicos tradicionais (Sharma *et al.*, 2021).

O tratamento por plasma é outra tecnologia avançada para a eliminação de resíduos plásticos. Esse processo decompõe os plásticos em gás de síntese (syngas), que pode ser utilizado como combustível ou matéria-prima para a indústria química. Contudo, os custos elevados e a necessidade de especialistas altamente qualificados representam desafios para sua implementação no Brasil (Bening *et al.*, 2022).

A bioengenharia de enzimas também desponta como uma inovação revolucionária no tratamento de resíduos plásticos. Enzimas projetadas podem degradar rapidamente plásticos, como PET, em suas moléculas básicas, facilitando a reciclagem (Sharma *et al.*, 2021). No entanto, os desafios incluem altos custos de pesquisa e a estabilidade das enzimas em processos industriais.

A pirólise híbrida, que combina métodos tradicionais com aquecimento por micro-ondas, aumenta a eficiência da conversão de resíduos plásticos em combustíveis. Essa abordagem reduz o tempo do processo e melhora a qualidade dos produtos gerados (Singh, Mansi; Singh, Madhulika; Singh, Sunil, 2024). Contudo, o custo elevado da tecnologia limita sua adoção em larga escala.

Por fim, a recuperação de plásticos com solventes possibilita a separação eficiente de diferentes polímeros, garantindo materiais reciclados de alta qualidade. Esse processo pode melhorar significativamente as taxas de reciclagem, desde que solventes mais econômicos sejam desenvolvidos para viabilizar sua aplicação comercial (Cheah *et al.*, 2022).

Dentre as tecnologias analisadas, a reciclagem mecânica se destaca como a solução mais acessível e viável para aplicação em larga escala no Brasil. Ela atende às necessidades imediatas de manejo de resíduos e promove inclusão social por meio do fortalecimento de cooperativas de catadores. Paralelamente, a transição para uma economia circular pode complementar a reciclagem mecânica, criando um sistema integrado de reaproveitamento de resíduos.

A inclusão de recolhedores de resíduos no sistema formal representa uma estratégia eficaz para integrar catadores ao sistema de reciclagem oficial, promovendo emprego, melhorias nas condições de trabalho e aumento da eficiência na separação de resíduos. Essa iniciativa já vem sendo aplicada em diversas cidades brasileiras por meio de cooperativas e políticas públicas de incentivo à reciclagem. Além de gerar benefícios sociais, essa tecnologia contribui para a redução de resíduos descartados inadequadamente, promovendo um impacto ambiental positivo (Gisi *et al.*, 2017).

O sucesso da implementação dessas tecnologias depende de investimentos em infraestrutura, incentivos fiscais e programas de capacitação profissional para garantir a sustentabilidade e eficiência das tecnologias adotadas no Brasil. Ademais é necessário testes-

piloto além de pesquisas para compreender a realidade de implantação dessas tecnologias no Brasil.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema central abordado na pesquisa é a crescente geração de resíduos plásticos e os desafios enfrentados para sua gestão eficiente no contexto urbano. A ausência de infraestrutura adequada, a baixa taxa de reciclagem e a falta de políticas públicas eficazes dificultam a implementação de soluções sustentáveis.

Os achados da pesquisa evidenciam ainda que a gestão eficaz dos resíduos sólidos plásticos é um fator crítico para o futuro das cidades. A combinação de inovação tecnológica e práticas sustentáveis pode não apenas solucionar problemas ambientais urgentes, mas também impulsionar o desenvolvimento econômico e social. A reciclagem mecânica, os sistemas de coleta inteligente e a digestão anaeróbia foram identificados como tecnologias acessíveis e adaptáveis à realidade brasileira, com potencial para aprimorar a eficiência da gestão de resíduos.

Além disso, a pesquisa destaca que a implementação dessas soluções depende de investimentos em infraestrutura, capacitação profissional e incentivos para inovação. A participação do setor público e privado é fundamental para que o Brasil acompanhe as tendências internacionais de sustentabilidade e adote um modelo de gestão de resíduos mais eficiente.

Por fim, para que as cidades se tornem verdadeiramente inteligentes, é essencial uma abordagem holística, que integre tecnologia, sustentabilidade e participação da comunidade. Essa visão sistêmica é a chave para garantir que o país avance na construção de um modelo urbano mais equilibrado e ambientalmente responsável.

Diante dos desafios identificados, futuras pesquisas podem explorar tecnologias de baixo custo e fácil implementação que sejam viáveis para diferentes contextos urbanos, especialmente em cidades com menor capacidade de investimento. O desenvolvimento de soluções acessíveis pode ampliar o alcance da gestão sustentável de resíduos plásticos e fomentar a inclusão de comunidades e pequenos negócios no setor da economia circular.

Além disso, é essencial aprofundar estudos sobre a formulação de políticas públicas que incentivem a adoção dessas tecnologias, seja por meio de incentivos fiscais, linhas de financiamento específicas ou programas governamentais que estimulem as empresas a incorporarem práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos. A criação de um ambiente regulatório favorável pode acelerar a transição para modelos mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para a consolidação de cidades inteligentes e ambientalmente responsáveis.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, F. *et al.* Analyzing the Deliberative Quality of Multi-Stakeholder Partnerships: A Heuristic Framework. **Global Governance**, v. 25, n. 3, p. 395-411, 2019. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/440953345/Alves-et-al-2019-pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- ALVES, L.; TAVARES, F.; DUARTE, C. The role of green technologies in the plastic waste crisis. **Science of the Total Environment**, v. 765, p. 142712, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721046805>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- ANAERGIA. **Advanced Anaerobic Digestion for Waste-to-Energy Solutions**. 2023. Disponível em: [www.anaergia.com](http://www.anaergia.com). Acesso em: 10 abr. 2025.
- ARAÚJO, M.; CACHAFEIRO, M.; VILLELA, L. Título do trabalho. **Nome do Periódico ou Evento**, Local, ano. [Detalhes adicionais conforme o tipo de publicação].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2011.
- BENING, C. R. *et al.* Towards a Circular Plastics Economy: Interacting Barriers and Enabling Measures. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123-134, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621011859>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- BORBA, Laila Machado; LUZ, Laíze Lantyer; MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez.. A Política Nacional de Resíduos Sólidos: eficácia jurídica e social das diretrizes impostas às atividades de reciclagem na Cidade de Salvador. 2021. Universidade Católica do Salvador. **Anais da 24ª Semana de Mobilização Científica – SEMOC**. Disponível em: <https://ri.ucsal.br/server/api/core/bitstreams/6a134585-76a7-48a5-a8df-f11566f1448e/content>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm/Constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm/Constituicao.htm). Acesso em: 10 abr. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2022. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm). Acesso em: 10 abr. 2025.
- BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. [Estatuto da Cidade] Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Seção 1, em 11 de julho de 2001. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110257.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm). Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Seção 1, em 03 de agosto de 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 10 abr. 2025.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C.; NIJKAMP, P. Smart Cities in Europe. **Journal of Urban Technology**, 18(2), 65–82. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CARVALHO, F. G. D.; GONÇALVES, J. D. Waring's Problem and the Hardy-Littlewood Circle Method. Dissertação (Mestrado em Ciências Matemáticas) – Universidade de Lund, 2023. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication?q=author+exact+fr6550ca-s>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo: CETESB, 2009.

CHEAH, C. G. *et al.* Innovation designs of industry 4.0 based solid waste management: machinery and digital circular economy. **Environmental Research**, v. 204, p. 111949, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393512200946X>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CHIA, K.; TAN, Y.; LIM, J. **Chemical recycling of plastics: a review**. *Environmental Research*, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393512200946X>. Acesso em: 10 dez. 2024.

COSTA, André Teixeira da. **Cidades inteligentes: o uso de tecnologia da informação e comunicação para a participação cidadã na gestão urbana**. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2022. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV\\_dc3ee48c01bec41db54bb45d03049f71](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_dc3ee48c01bec41db54bb45d03049f71). Acesso em: 10 abr. 2025.

DAVIS, R.; CLARK, H.; COHEN, A. Circular economy and its role in sustainable development goals. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 162, p. 105053, 2020.

DIVINO, Sthéfano Bruno Santos; MAGALHÃES, Rodrigo Almeida. Cidades inteligentes sustentáveis: estratégias para implementação e efetivação. **Revista de Direito da Cidade**, v. 15 n. 4, 2023. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/rdc/article/view/64822>. Acesso em: 10 abr. 2025.

DUARTE, I. G.; BAIARDI, A. Desenvolvimento sustentável: controvérsias e aplicações no direito brasileiro. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. e5852, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n7-188. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5852>. Acesso em: 30 dez. 2024.

DUARTE, J. Resultado das Eleições para a Câmara dos Representantes, Distrito 13 da Califórnia. **Ballotpedia**, 2022. Disponível em: [https://ballotpedia.org/John\\_Duarte](https://ballotpedia.org/John_Duarte). Acesso em: 10 abr. 2025.

DULLEY, R. Noção de Natureza, Ambiente, Meio Ambiente, Recursos Ambientais e Recursos Naturais. **Agric. São Paulo**, São Paulo, v. 51, n. 2, p. 15-26, jul./dez. 2004. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/pdf/asp-2-04-2.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ENGIE. **Universal Registration Document 2023**. Disponível em: <https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2024-03/ENGIE%20-%202023%20UNIVERSAL%20REGISTRATION%20DOCUMENT.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

FERNANDES, A.; VASCONCELOS, P.; LEMOS, A. Cidades e inteligência. **Academia de Ciências da Bahia**. 2022. Disponível em: [https://cienciasbahia.org.br/webinarios/wp-content/uploads/2022/05/acb\\_GT\\_cidades.pdf](https://cienciasbahia.org.br/webinarios/wp-content/uploads/2022/05/acb_GT_cidades.pdf). Acesso em: 10 abr. 2025.

FERNANDO, S.; HUSSAIN, M.; ALI, M. Waste-to-energy technologies: current status and future prospects. **Waste Management**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18307086>. Acesso em: 10 dez. 2024.

FERNANDO, Y. *et al.* Pursuing Green Growth in Technology Firms through the Connections between Environmental Innovation and Sustainable Business Performance: Does Service Capability Matter? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 8-20, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/328802790\\_Pursuing\\_green\\_growth\\_in\\_technology\\_firms\\_through\\_the\\_connections\\_between\\_environmental\\_innovation\\_and\\_sustainable\\_business\\_performance\\_Does\\_service\\_capability\\_matter](https://www.researchgate.net/publication/328802790_Pursuing_green_growth_in_technology_firms_through_the_connections_between_environmental_innovation_and_sustainable_business_performance_Does_service_capability_matter). Acesso em: 10 abr. 2025.

GISI, S. DE; CASELLA, P.; SABIA, G. *et al.* Integrating informal recycling into formal systems. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], 2017.

GUPTA, R.; KAPOOR, N.; VERMA, P. Integrated waste management strategies for plastic waste. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723019102>. Acesso em: 10 dez. 2024.

HALL, R. E. The Vision of a Smart City. In: **Proceedings of the 2nd International Life Extension Technology Workshop**. Paris: [Editora], 2000. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1897490>. Acesso em: 10 abr. 2025.

HARPER, Gavin *et al.* Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, v. 575, p. 75–86, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 10 abr. 2025.

HARRISON, C.; DONNELLY, IA Uma Teoria de Cidades Inteligentes. **Anais da 55ª Reunião Anual do ISSS** - 2011, Hull, Reino Unido , v. 55, n. 1, 23 de setembro de 2011.

HART, A.; WINTER, D.; MITCHELL, M. Plastics in urban ecosystems: a review of emerging technologies. **Science of the Total Environment**, v. 711, p. 134757, 2020.

HARTLEY, Kris *et al.* A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, p. 137176, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176>. Acesso em: 10 de abr. 2025.

HERRERA, L.; GONÇALVES, R.; SANTOS, T. Technological innovations in the plastic waste sector for sustainable development. **Waste Management & Research**, v. 61, p. 42-51, 2023.

HOSSAIN, R.; ISLAM, M. T.; SAHAJWALLA, V. Full circle: challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622027160>. Acesso em: 11 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Estatísticas do Cadastro Central de Empresas – CEMPRE 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/en/statistics/economic/services/17460-statistics-of-the-central-register-of-enterprises.html?edicao=40446>. Acesso em: 10 abr. 2025.

JONES, S.; FRIEDMAN, K.; KENDALL, R. Technology and waste management systems: innovation for circular economy. **Journal of Environmental Technolog**, v. 56, p. 1789-1795, 2023.

JORDAN, C.; LEON, J.; ZHANG, F. Plastics recycling and waste management strategies in the context of global supply chains. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 78, p. 106345, 2022.

KANTER, Rosabeth Moss; LITOW, Stanley S. Informed and Interconnected: A Manifesto for Smarter Cities. **Harvard Business School**. Working Paper, No. 09-141, June, 2009. Disponível em: <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=36185>. Acesso em: 10 abr. 2025.

KASSAB, A. *et al.* Avanço da Reciclagem de Plástico: Desafios e Oportunidades na Integração da Impressão 3D e da Reciclagem Distribuída para uma Economia Circular. **Polímeros**, 15 (19), 3881. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15193881>. Acesso em: 10 abr. 2025.

KELLY, E.; JAMES, M.; COOPER, A. Municipal solid waste management in smart cities: a review of emerging technologies. **Waste Management & Research**, v. 49, p. 345-358, 2020.

KIM, B.; CHO, J.; RYU, S. Plastics and sustainability: the role of recycling and alternative materials. **Materials Science & Engineering**, v. 60, p. 130-141, 2022.

KRAUSE, M. *et al.* Circular economy and waste management: challenges and opportunities. **Environmental Science & Technology**, v. 54, p. 548-559, 2022. DOI: 10.1021/es202653z.

LEE, H.; PARK, M.; CHUNG, W. Towards zero waste cities: a systematic review of innovations in urban waste management. **Sustainability**, v. 13, p. 3112, 2021.

MANÉ, B.; FREGADOLLI, B.; VARESCHINI, D. T. Sustentabilidade Integrando Diversos Setores: Cidades Inteligentes. In: **Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química**. Recife: Even3, 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/353023489\\_SUSTENTABILIDADE\\_INTEGRANDO\\_O\\_DIVERSOS\\_SETORES\\_CIDADES\\_INTELIGENTES](https://www.researchgate.net/publication/353023489_SUSTENTABILIDADE_INTEGRANDO_O_DIVERSOS_SETORES_CIDADES_INTELIGENTES). Acesso em: 10 abr. 2025.

MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez. Novas perspectivas na gestão do saneamento: apresentação de um modelo de destinação final de resíduos sólidos urbanos. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 7, p. 91-105, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/kZV9T6f3fDPsf5gMMMcMKqN/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MARCHI, M. De. A Taxonomy of S&T Indicators. **Scientometrics**, v. 106, p. 1265-1268, 2016. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2634068>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MARCHI-SILVA, R. *et al.* New Insights on Childhood Lupus Nephritis. **Journal of Pediatric Nephrology**, v. 39, n. 1, p. 45-58, 2024. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/387960671\\_New\\_Insights\\_on\\_Childhood\\_Lupus\\_Nephritis](https://www.researchgate.net/publication/387960671_New_Insights_on_Childhood_Lupus_Nephritis). Acesso em: 10 abr. 2025.

MILLS, D.; GRAY, M.; PARKER, J. Waste-to-energy solutions in urban waste management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 536-550, 2016.

MORAES, F.; BORJA, A. The European Water Framework Directive: A Challenge for Near Shore, Coastal and Continental Shelf Research. **Continental Shelf Research**, v. 25, p. 1768-1783, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278434305001137>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MORENO, A.; SELOVA, R.; CERRATO, J. Advanced waste management and recycling technologies. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 9, 2019.

MOTA, R. *et al.* Skin Adhesive versus Subcuticular Suture for Episiotomy Repair: A Randomized Controlled Trial. **Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine**, v. 22, n. 8, p. 681-687, 2009. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2679760>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MÜLLER, T.; SCHMIDT, H.; BECKER, R. Plasma-based waste treatment: Innovations for sustainable recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 127846, 2021.

MUNOZ, F.; GRAY, H.; WILLIAMS, S. Digitalization and waste management in smart cities: current trends and future directions. **Journal of Urban Technology**, v. 29, p. 131-144, 2022.

OCHOA, G.; MORAES, R.; ALMEIDA, E. Strategies for managing plastic waste: approaches in circular economy. **Journal of Waste Management**, v. 68, p. 203-211, 2021.

O'CONNOR, D.; FOSTER, K.; BAKER, R. Bio-based plastics: a new era for waste reduction and sustainability. **Science Advances**, v. 7, p. eabb1042, 2021.

OLIVEIRA, D.; GONÇALVES, M.; LIMA, F. Addressing the global plastic waste problem: policy and technological innovations. **Journal of Environmental Policy & Planning**, v. 24, p. 16-29, 2021.

PIMENTA, R.; CARRILHO, M.; LIMA, F. Sustainability challenges in plastic waste management: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 797-810, 2020.

RECYCLINGINSIDE. Recycling Industry News. 2022. Disponível em: <https://recyclinginside.com/recycling-waste-news/recycling-industry-news/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

REIS, Wender; BARRETO, Cristiane; CAPELARI, Mauro. Circular Economy and Solid Waste Management: Connections from a Bibliometric Analysis. **Sustainability**. 15. 15715. 10.3390/su152215715. 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/375500314\\_Circular\\_Economy\\_and\\_Solid\\_Waste\\_Management\\_Connections\\_from\\_a\\_Bibliometric\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/375500314_Circular_Economy_and_Solid_Waste_Management_Connections_from_a_Bibliometric_Analysis). Acesso em: 11 abr. 2025.

REYES, F.; MARTINEZ, P.; TORO, J. Future perspectives of chemical recycling for the management of plastic waste. **Journal of Environmental Science**, v. 72, p. 42-52, 2021.

RIOS, S.; BARTON, J.; VILLANUEVA, R. Advances in recycling of polymeric materials: a review. **Polymers**, v. 13, p. 1273, 2021.

RITTL, L. G. F.; ZAMAN, A.; DE OLIVEIRA, F. H. Digital Transformation in Waste Management: Disruptive Innovation and Digital Governance for Zero-Waste Cities in the Global South as Keys to Future Sustainable Development. **Sustentabilidade**, 17 (4), 1608. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17041608>. Acesso em: 11 abr. 2025.

RUTKOWSKI, L.; KOWALSKI, Z.; PIECZYŃSKI, M. Waste management and recycling practices in Poland. **Waste Management & Research**, [S.l.], 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242x15607424>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SHARMA, B. K.; CHANDEL, M. K. Life cycle cost analysis of municipal solid waste management scenarios for Mumbai, India. **Waste Management**, v. 124, p. 293-302, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.002>. Acesso em: 11 abr. 2025.

SHARMA, H. B. *et al.* Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: solutions for post-COVID recovery. **Science of the Total Environment**, v. 800, p. 149605, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721046805>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SILVA, João Paulo Barbosa da. **Quadro sobre os eixos temáticos do Ranking Connected Smart Cities 2023**. Elaboração própria, 2024.

SILVA, João Paulo Barbosa da; MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez. Novas tecnologias dos RS plásticos: cuidados para o alcance do desenvolvimento sustentável. *In: SEMOC – SEMANA DE MOBILIZAÇÃO CIENTÍFICA DA UCSAL, 2024, Salvador. Anais [...]*. Salvador: UCSAL, 2024. Disponível em: <https://ucsal.github.io/semoc/arquivos/anais-semoc-2024-compressed.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SILVA, M.; SANTOS, C.; ALMEIDA, P. Plastic recycling technologies for sustainable cities. **Environmental Management**, v. 67, p. 2123-2131, 2023.

SINGH, M.; SINGH, S. K.; SINGH, M. Tackling municipal solid waste crisis in India: insights into cutting-edge technologies and risk assessment. **Science of the Total Environment**, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724005904>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein**, v. 8, n. 1, p. 102-106, 2010.

TERASENSE. **Terahertz waves for plastic recycling**. 2022. Disponível em: [www.terasense.com](http://www.terasense.com). Acesso em: 10 abr. 2025.

TONG, Y.; LEE, W.; CHEN, L. Technologies for sustainable plastic waste management. **Environmental Science & Technology**, v. 54, p. 5624-5630, 2021.

TOPPETA, D. The Smart City Vision: How Innovation and ICT Can Build Smart, “Livable”, Sustainable Cities. The Innovation Knowledge Foundation, Vol. 5, 1-9, 2010. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2431515>. Acesso em: 10 abr. 2025.

URBAN SYSTEMS. **Ranking connected smart cities**. 2023. Disponível em: [https://web.nectainova.com.br/ranking-csc\\_2023](https://web.nectainova.com.br/ranking-csc_2023). Acesso em: 10 abr. 2025.

WEISS, Marcos Cesar; BERNARDES, Roberto Carlos; CONSONI, Flavia Luciane. **urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana**. 7 (3) Sep-Dec 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.007.003.AO01>. Acesso em: 10 abr. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The New Plastics Economy**: Rethinking the future of plastics. Geneva: WEF, 2016. Disponível em: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_New\\_Plastics\\_Economy.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf). Acesso em: 10 abr. 2025.

XAVIER, Lucas Felipe Barros; OLIVEIRA, Breno de; GUSMÃO, Ana Paula Henriques de. Revisão sistemática da literatura sobre o uso de tecnologia da informação combinada às técnicas de gestão urbana para concepção de cidades inteligentes. **XLII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Foz do Iguaçu, Paraná, 2022. Disponível em: [https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_ST\\_390\\_1938\\_43498.pdf](https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_390_1938_43498.pdf). Acesso em: 10 abr. 2025.

XEVENOS, D.; PAPADASKALOPOULOU, C.; KOUTSAIANTIS, K. *et al.* **Waste-to-energy systems for metropolitan cities**. **Waste and Biomass Valorization**, [S.l.], 2015.

YAMAMOTO, Y.; SATO, H.; TAKEDA, M. Circularity and innovation in plastic recycling. **Journal of Waste Management**, v. 58, p. 472-482, 2021.