

## **Cidades inteligentes: tecnologias de baixo custo para a gestão de resíduos plásticos**

### ***Smart cities: low-cost technologies for plastic waste management***

*Ciudades Inteligentes: Tecnologías de bajo costo para la gestión de residuos plásticos*

João Paulo Barbosa da Silva<sup>1</sup>  
Cristina Maria Dacach Fernandez Marchi<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Mestre em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Social pela Universidade Católica do Salvador (UCSAL) e graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Jorge Amado (UNIJORGE). **E-mail:** joao.pbs25@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9632-2597>

<sup>2</sup> Pós-doutora pela Stockholm University (SU), Suécia; doutora em Geologia pela Universidade Federal da Bahia (UFBA); mestre em Desenvolvimento Regional e Urbano pela Universidade Salvador (UNIFACS); e graduada em Administração pela Universidade Católica do Salvador (UCSAL). Professora e pesquisadora da UCSAL, atuando no Programa de Pós-Graduação em Território, Ambiente e Sociedade e no Departamento de História. Desenvolve pesquisas nas áreas de gestão ambiental, participação cidadã e políticas públicas, com ênfase em planejamento urbano sustentável e conflitos socioambientais relacionados à implantação de grandes projetos. **E-mail:** cristina.marchi@pro.ucsal.br, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2078-9048>

**Resumo:** A gestão dos resíduos plásticos representa um dos principais desafios urbanos contemporâneos, especialmente em países em desenvolvimento, onde a escassez de recursos dificulta a implementação de tecnologias de alto custo. Este artigo analisa soluções tecnológicas de baixo custo aplicáveis à gestão de resíduos plásticos, com foco em sua contribuição para o desenvolvimento de cidades inteligentes no Brasil. Por meio de revisão bibliográfica sistemática, foram identificadas e avaliadas três tecnologias com elevado potencial de aplicabilidade: reciclagem mecânica, inclusão de catadores no sistema formal e coleta inteligente com sensores simples. A análise foi conduzida a partir de critérios relacionados aos eixos temáticos propostos pelo *Ranking Connected Smart Cities* (Urban Systems, 2023), considerando também o custo de implementação. Os resultados demonstram que tais tecnologias, embora simples, atendem a múltiplos critérios de sustentabilidade urbana e podem ser adaptadas às realidades locais, promovendo impactos positivos nos âmbitos ambiental, social e econômico. Conclui-se que as cidades inteligentes podem ser construídas com soluções acessíveis, que aliem inovação, inclusão e viabilidade financeira.

**Palavras-chave:** resíduos plásticos; cidades inteligentes; tecnologias sustentáveis; economia circular; baixo custo.

**Abstract:** The management of plastic waste represents one of the main contemporary urban challenges, especially in developing countries where limited resources hinder the implementation of high-cost technologies. This article analyzes low-cost technological solutions applicable to plastic waste management, focusing on their contribution to the development of smart cities in Brazil. Through a systematic literature review, three technologies with high applicability potential were identified and evaluated: mechanical recycling, the inclusion of waste pickers in the formal system, and smart collection using simple sensors. The analysis was conducted based on the thematic axes proposed by the *Ranking Connected Smart Cities* (Urban Systems, 2023), also considering implementation costs. The results show that these technologies, although simple, meet multiple urban sustainability criteria and can be adapted to local realities, promoting positive environmental, social, and economic impacts. It is concluded that smart cities can be built with accessible solutions that combine innovation, inclusion, and financial feasibility.

**Keywords:** plastic waste; smart cities; sustainable technologies; circular economy; low cost.

**Resumen:** La gestión de los residuos plásticos representa uno de los principales desafíos urbanos contemporáneos, especialmente en los países en desarrollo, donde la escasez de recursos dificulta la implementación de tecnologías de alto costo. Este artículo analiza soluciones tecnológicas de bajo costo aplicables a la gestión de residuos plásticos, con énfasis en su contribución al desarrollo de ciudades inteligentes en Brasil. A través de una revisión bibliográfica sistemática, se identificaron y evaluaron tres tecnologías con alto potencial de aplicabilidad: el reciclaje mecánico, la inclusión de recicladores en el sistema formal y la recolección inteligente con sensores simples. El análisis se realizó a partir de los ejes temáticos propuestos por el *Ranking Connected Smart Cities* (Urban Systems, 2023), considerando también el costo de implementación. Los resultados demuestran que dichas tecnologías, aunque simples, cumplen múltiples criterios de sostenibilidad urbana y pueden adaptarse a las realidades locales, promoviendo impactos positivos en los ámbitos ambiental, social y económico. Se concluye que es posible construir ciudades inteligentes con soluciones accesibles que integren innovación, inclusión y viabilidad financiera.

**Palabras clave:** residuos plásticos; ciudades inteligentes; tecnologías sostenibles; economía circular; bajo costo.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização global tem intensificado os desafios relacionados à gestão de resíduos sólidos, especialmente os resíduos plásticos. Produzidos em larga escala e com baixa taxa de decomposição, os plásticos representam uma ameaça significativa ao meio ambiente urbano, impactando diretamente a qualidade do solo, da água e do ar, além de sobrecarregar os sistemas de saneamento e de limpeza pública. No Brasil, estima-se que apenas uma pequena fração dos resíduos plásticos gerados é efetivamente reciclada, o que evidencia falhas estruturais e operacionais no modelo tradicional de gestão de resíduos. A reciclagem efetiva dos resíduos plásticos ainda representa um grande desafio. Nesse contexto, as cidades inteligentes surgem como um modelo promissor para enfrentar os dilemas urbanos contemporâneos, ao utilizarem tecnologias de informação e comunicação (TIC) para tornar os serviços urbanos mais eficientes, sustentáveis e inclusivos.

A gestão inteligente de resíduos sólidos se refere à aplicação de tecnologias digitais, estratégias de análise de dados e sistemas automatizados para otimizar todo o ciclo de vida dos resíduos, da geração à destinação final, com foco em eficiência, sustentabilidade e participação cidadã. Essa abordagem se integra ao conceito de cidades inteligentes (*smart cities*), priorizando a tomada de decisões baseada em dados, o uso de sensores e plataformas digitais e a articulação entre setores públicos, privados e a sociedade civil para promover práticas mais sustentáveis e circulares. Por meio da aplicação de soluções inovadoras, como sensores para coleta otimizada, plataformas de monitoramento e sistemas de reciclagem avançada, é possível reduzir os impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida da população.

Entretanto, muitas das tecnologias de ponta associadas às cidades inteligentes ainda são de difícil acesso para países em desenvolvimento, devido aos altos custos de implementação, operação e manutenção. Nesse contexto, destaca-se a importância de identificar e levantar tecnologias existentes e de baixo custo, que possam ser incorporadas de forma adaptativa e eficaz em realidades urbanas com limitações financeiras e estruturais. Soluções como a reciclagem mecânica, a inclusão de catadores no sistema formal e a coleta inteligente, com uso moderado de tecnologia, representam alternativas viáveis e escaláveis para os municípios brasileiros.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo analisar tecnologias de baixo custo para a gestão de resíduos sólidos plásticos, com potencial de contribuir para o alcance do status de cidades inteligentes no Brasil, considerando sua aderência aos eixos temáticos propostos pelo *Ranking Connected Smart Cities* e sua viabilidade de aplicação em contextos urbanos com infraestrutura limitada.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Gestão de resíduos plásticos e sustentabilidade urbana**

A produção e o consumo de plásticos aumentaram de forma exponencial nas últimas décadas, impulsionados por sua versatilidade, durabilidade e baixo custo de fabricação. Entretanto, essas mesmas características tornam os resíduos plásticos um dos principais desafios ambientais da atualidade, especialmente nos centros urbanos. Estima-se que apenas 9% dos resíduos plásticos sejam reciclados globalmente, enquanto o restante é descartado em aterros, incinerado ou despejado em ambientes naturais (WEF, 2019).

No contexto urbano, a gestão inadequada desse tipo de resíduo afeta diretamente a saúde pública, a qualidade ambiental e o funcionamento dos sistemas de drenagem, contribuindo para enchentes e poluição. A sustentabilidade urbana, nesse sentido, passa a depender de estratégias eficazes de coleta, triagem, tratamento e reaproveitamento dos resíduos sólidos, com ênfase crescente nos resíduos plásticos.

Segundo Marchi (2015), a minimização da geração de resíduos deve começar na origem, o que inclui mudanças culturais, incentivos à separação de materiais e inclusão de catadores nos sistemas formais. A adoção de tecnologias apropriadas à realidade local é uma das chaves para garantir uma gestão eficiente e ambientalmente responsável, sobretudo em cidades de médio e pequeno porte. Essa abordagem fortalece os princípios da economia circular, ao priorizar soluções que promovem a redução, a reutilização e a reciclagem de resíduos, gerando valor a partir de materiais descartados e contribuindo para a construção de sistemas urbanos mais sustentáveis e resilientes.

A economia circular tem se destacado como uma abordagem estratégica. Em vez de um modelo linear de “extrair-produzir-descartar”, a economia circular propõe a reinserção dos materiais no ciclo produtivo, promovendo a reutilização, a reciclagem e o redesign de produtos.

Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2020), essa abordagem pode gerar benefícios econômicos, sociais e ambientais significativos, reduzindo a dependência de recursos virgens e minimizando a geração de resíduos. Políticas públicas voltadas à logística reversa, incentivos fiscais à indústria da reciclagem e o fortalecimento de cooperativas de catadores são instrumentos fundamentais para a materialização dessa transição (Brasil, 2010; Ellen Macarthur Foundation, 2022). Além disso, o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de baixo custo voltadas à triagem automática, à valorização energética e à fabricação de novos produtos a partir de plásticos reciclados representam soluções promissoras para contextos urbanos com orçamento limitado.

Estudo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2021) aponta que soluções descentralizadas e tecnológicas adaptadas à realidade local podem aumentar em até 50% as taxas de recuperação de resíduos em cidades de médio porte.

É essencial destacar o papel da educação ambiental e da governança participativa. A sensibilização da população para a redução do consumo de plásticos de uso único e o engajamento em práticas de descarte correto são aspectos estruturantes para o sucesso de qualquer política pública nessa área.

De acordo com o Relatório do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2020), campanhas de conscientização e programas educativos contínuos são fundamentais para a construção de uma cultura de consumo responsável. A gestão dos resíduos plásticos, portanto, deve ser entendida como um componente estratégico das políticas urbanas voltadas à sustentabilidade e à resiliência das cidades contemporâneas (UN-habitat, 2022).

Além das estratégias já mencionadas, é fundamental reconhecer o papel das políticas públicas integradas e intersetoriais na gestão dos resíduos plásticos urbanos. A coordenação entre diferentes níveis de governo – municipal, estadual e federal – e a articulação com o setor privado e a sociedade civil são essenciais para criar um sistema eficiente e sustentável. Segundo

a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), políticas fragmentadas ou isoladas tendem a ser menos eficazes, enquanto abordagens colaborativas promovem a otimização dos recursos e a ampliação do impacto positivo das ações.

Outro aspecto relevante é a importância da inovação tecnológica no desenvolvimento de materiais plásticos biodegradáveis e compostáveis, que podem reduzir significativamente os impactos ambientais dos resíduos urbanos. Embora esses materiais não sejam uma solução definitiva, sua incorporação em produtos de uso único pode contribuir para a diminuição da persistência dos resíduos plásticos no meio ambiente, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Contudo, é imprescindível que o manejo desses materiais também esteja alinhado com sistemas de coleta e tratamento adequados para evitar contaminação e garantir sua correta destinação.

A dimensão econômica da gestão de resíduos plásticos merece destaque, pois a reciclagem e o reaproveitamento desses materiais podem gerar importantes oportunidades de emprego e renda, especialmente em países em desenvolvimento. Conforme apontado por Dias (2019), a formalização e o fortalecimento das cadeias produtivas da reciclagem promovem a inclusão social e fomentam a economia local, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução dos impactos ambientais urbanos. Portanto, o investimento em capacitação, infraestrutura e políticas de incentivo é fundamental para transformar os resíduos plásticos em recursos econômicos valiosos.

Além disso, a participação ativa da comunidade é um fator determinante para o sucesso das políticas de gestão de resíduos plásticos. A mobilização social, por meio de campanhas educativas, oficinas e projetos comunitários, estimula a adoção de práticas sustentáveis no cotidiano dos cidadãos, como a redução do consumo de plásticos descartáveis e a correta separação dos resíduos. Conforme destaca a literatura, a construção de uma cultura ambiental sólida depende da continuidade dessas ações e do envolvimento de diversos atores sociais, incluindo escolas, empresas e organizações não governamentais (Silva; Marchi, 2024).

Por fim, é importante considerar os desafios relacionados à infraestrutura urbana para a gestão adequada dos resíduos plásticos. Muitas

idades enfrentam limitações em termos de capacidade de coleta, triagem e tratamento, o que compromete a eficiência dos sistemas de gestão. Investimentos em infraestrutura, aliados à modernização dos processos e à adoção de tecnologias inteligentes, são imprescindíveis para superar essas barreiras e garantir a sustentabilidade dos centros urbanos (UNEP, 2021). A integração de soluções digitais, como aplicativos de coleta seletiva e plataformas de monitoramento, pode otimizar a logística e ampliar a participação dos cidadãos, tornando a gestão mais eficiente e transparente.

## **2.2 Cidades Inteligentes: conceito e eixos temáticos**

As chamadas cidades inteligentes representam um modelo urbano orientado pela integração de tecnologias digitais, pela inovação e pelo planejamento sustentável. De acordo com Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011), uma cidade inteligente é aquela que utiliza tecnologias avançadas para melhorar a eficiência dos serviços urbanos e promover o bem-estar social, econômico e ambiental de forma integrada.

Para além da infraestrutura tecnológica, o conceito de cidades inteligentes envolve uma abordagem multidimensional que integra aspectos como a governança participativa, a educação de qualidade, a eficiência energética, a mobilidade sustentável e a resiliência ambiental (Giffinger & Haindl, 2010; Hall, 2000). Essa concepção amplia a ideia de cidade conectada, incorporando valores sociais, ambientais e econômicos como pilares do desenvolvimento urbano sustentável.

No contexto brasileiro, a Urban Systems (2023) contribuiu significativamente para a compreensão desse conceito ao sistematizar os principais elementos das cidades inteligentes em 11 eixos temáticos. Esses eixos funcionam como critérios para mensurar o grau de inteligência e de conectividade dos municípios. De acordo com o estudo, para que uma cidade seja considerada inteligente, ela deve atender a, no mínimo, 6 dos 11 eixos definidos. A seguir, apresenta-se o Quadro 1, que resume os 11 eixos temáticos propostos pela Urban Systems, acompanhados de uma breve descrição do significado e do escopo de cada um.

Quadro 1 – Resumo dos 11 eixos temáticos apresentados pela pesquisa Urban Systems (2023)

<b>Eixo Temático</b>	<b>Descrição</b>
1. Mobilidade	Infraestrutura e serviços de transporte, acessibilidade e eficiência na locomoção urbana.
2. Urbanismo	Planejamento urbano, habitação, uso do solo e qualidade dos espaços públicos.
3. Meio Ambiente	Sustentabilidade, gestão de resíduos, qualidade do ar e áreas verdes.
4. Tecnologia e Inovação	Investimento em tecnologia, acesso à internet, startups e digitalização de serviços públicos.
5. Economia	Desenvolvimento econômico, mercado de trabalho e competitividade dos municípios.
6. Educação	Qualidade do ensino, acesso à educação básica e superior, investimentos e indicadores de desempenho.
7. Saúde	Infraestrutura hospitalar, cobertura do SUS, número de médicos por habitante e qualidade dos serviços de saúde.
8. Segurança	Índices de criminalidade, investimento em policiamento, monitoramento e políticas de segurança pública.
9. Empreendedorismo	Incentivo ao empreendedorismo, número de empresas ativas, ambiente de negócios e inovação.
10. Governança	Transparência, participação social, eficiência na administração pública e digitalização de serviços.
11. Energia	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).

Dando sequência, são apresentados os 11 eixos temáticos e suas respectivas conexões com a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), evidenciando como esses aspectos se inter-relacionam no contexto das cidades inteligentes.

O eixo Mobilidade apresenta interseções relevantes com a gestão dos RSU, especialmente na otimização de rotas de coleta, o que contribui para a redução do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes. A utilização de sensores e algoritmos de roteirização inteligente torna o

transporte de resíduos mais eficiente, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da inovação tecnológica.

No eixo Urbanismo, a criação de bairros planejados com ecopontos e infraestrutura adequada para a coleta seletiva facilita o reaproveitamento de materiais e contribui para a redução dos impactos ambientais decorrentes do descarte irregular.

O eixo Meio Ambiente é central para a gestão dos RSU, ao englobar práticas como compostagem, reciclagem, uso de biodigestores e implantação de aterros sanitários controlados. Sistemas digitais de monitoramento podem ampliar a eficiência e o controle ambiental dessas ações.

O eixo Energia também se relaciona diretamente aos resíduos, especialmente por meio de tecnologias de valorização energética, como o *waste-to-energy*, que permitem a conversão de resíduos em fontes alternativas de energia.

No eixo Tecnologia e Inovação, soluções como o rastreamento de resíduos, a triagem automatizada e as plataformas digitais de logística reversa demonstram como a transformação digital pode revolucionar a gestão dos RSU.

O eixo Governança exige transparência, participação cidadã e articulação entre as esferas de governo. Ferramentas como portais de dados abertos, audiências públicas e conselhos participativos são essenciais para uma gestão democrática e eficiente dos resíduos.

O eixo Economia reforça a relevância da cadeia dos RSU, que movimenta uma economia significativa por meio da economia circular. Políticas públicas de incentivo à reciclagem, compras sustentáveis e fomento à cadeia produtiva da reutilização são estratégicas nesse contexto.

No eixo Empreendedorismo, há espaço para o fortalecimento de startups ambientais e cooperativas que atuam na reutilização e na transformação de resíduos, ampliando as oportunidades de inovação e de geração de renda.

O eixo Educação se conecta diretamente à educação ambiental, elemento fundamental para a conscientização da população, a redução da geração de resíduos e a adesão às práticas de coleta seletiva.

No eixo Saúde, a má gestão dos resíduos sólidos impacta negativamente a saúde pública. A coleta e a destinação corretas contribuem para

ambientes mais limpos e saudáveis, reduzindo os riscos de contaminação e de proliferação de vetores.

Por fim, o eixo Segurança apresenta relação indireta com os RSU, especialmente em áreas de descarte irregular, que podem se tornar focos de insegurança urbana. Além disso, a segurança do trabalho para catadores e demais trabalhadores da cadeia de resíduos também é um ponto relevante.

Essa análise evidencia que 10 dos 11 eixos definidos pela Urban Systems têm relação direta ou indireta com a gestão dos resíduos sólidos, o que demonstra que uma abordagem integrada, sustentável e tecnologicamente orientada para os RSU é essencial para o desenvolvimento pleno das cidades inteligentes no Brasil.

A análise desses eixos revela que as cidades mais bem posicionadas no ranking são aquelas que investem de forma equilibrada em todas essas dimensões, promovendo sustentabilidade, inovação e qualidade de vida para a população. Assim, uma cidade inteligente não se define apenas pelo uso de tecnologias avançadas, mas pela capacidade de integrar inovação, planejamento urbano eficiente e políticas públicas comprometidas com o bem-estar coletivo.

Alguns dos principais desafios nesse processo estão relacionados à transformação estrutural que as cidades vêm enfrentando para aprimorar seus sistemas de saneamento, mobilidade, energia, segurança e digitalização. Trata-se de um esforço contínuo para superar o modelo tradicional das cidades contemporâneas e avançar rumo à consolidação de um modelo baseado nos princípios das 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, entre outros. Para Carvalho e Gonçalves (2023), a sociedade vem exigindo paulatinamente 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 o alcance da 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 e data centers que permitam atender aos desafios e à visão transformadora das zonas urbanas.

### **2.3 Economia circular e inovação tecnológica de baixo custo**

A transição para cidades sustentáveis demanda não apenas inovação tecnológica, mas também novos modelos econômicos baseados na economia circular. Diferentemente do modelo linear (extrair-produzir-descartar), a economia circular propõe um ciclo contínuo de reaproveitamento de materiais, com foco na redução do desperdício e no prolongamento do valor dos produtos (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

No contexto dos resíduos plásticos, essa abordagem inclui estratégias como reciclagem mecânica, reaproveitamento de materiais na indústria da construção civil, transformação de resíduos em energia e integração social de catadores como agentes da circularidade. Quando combinadas com soluções tecnológicas simples e escaláveis, essas práticas se tornam especialmente relevantes para cidades com recursos financeiros limitados.

A literatura recente tem destacado a importância de promover inovações de baixo custo, que podem ser aplicadas mesmo em contextos de baixa infraestrutura e baixa qualificação técnica. Tecnologias como sensores básicos para coleta inteligente, processos simplificados de triagem, plataformas digitais de mapeamento e a própria organização de cooperativas de reciclagem são exemplos de inovações sociais e tecnológicas com alto potencial de impacto (Silva; Marchi, 2024).

Consoante isso, é importante destacar que o conceito de inovação tecnológica de baixo custo se refere ao desenvolvimento e à aplicação de soluções acessíveis, adaptáveis e eficientes que visam resolver problemas sociais e ambientais em contextos de recursos limitados. Essas inovações não necessariamente envolvem alta sofisticação técnica, mas sim criatividade na adaptação de recursos disponíveis, priorizando a viabilidade econômica e o impacto social.

Segundo Prahalad (2005), em sua obra *The Fortune at the Bottom of the Pyramid*, o foco em tecnologias de baixo custo permite alcançar mercados negligenciados por soluções convencionais, promovendo a inclusão social e o desenvolvimento sustentável. No mesmo sentido, Radjou, Prabhu e Ahuja (2012) cunham o termo inovação frugal para descrever práticas que entregam mais valor com menos recursos — conceito aplicável à gestão de resíduos em cidades com baixa capacidade financeira.

Autores que discutem inovação frugal e inovação social destacam o potencial dessas abordagens para a gestão pública, especialmente na busca por soluções de baixo custo, adaptadas às realidades locais e capazes de enfrentar desafios urbanos complexos, como saneamento, gestão de resíduos sólidos e mobilidade urbana. Nesse contexto, tecnologias apropriadas, equipamentos de baixo custo e ferramentas digitais acessíveis podem contribuir para ampliar a eficiência operacional e a inclusão social, particularmente em municípios com restrições financeiras e estruturais.

Além disso, Mulgan (2007) reforça que as inovações sociais de baixo custo são sustentáveis quando há articulação entre tecnologia, políticas públicas e capital humano local, o que é frequentemente observado em iniciativas lideradas por cooperativas de catadores e startups ambientais.

No contexto da gestão urbana, Coelho e Britto (2020) analisam experiências brasileiras de reaproveitamento de resíduos urbanos com soluções tecnológicas apropriadas e apontam que a replicabilidade e a adaptabilidade dessas soluções são fatores decisivos para o sucesso em municípios de pequeno e médio porte.

### **3 METODOLOGIA**

Este artigo adota uma abordagem qualitativa de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em pesquisa bibliográfica sistemática sobre tecnologias aplicáveis à gestão de resíduos plásticos no contexto de cidades inteligentes. O objetivo principal foi identificar e analisar tecnologias de baixo custo com potencial de contribuir para o alcance do status de cidade inteligente, especialmente em municípios brasileiros com limitações orçamentárias e estruturais.

A coleta de dados foi realizada em bases científicas consolidadas, como Scopus, Web of Science, SciELO e Google Acadêmico, com recorte temporal entre os anos de 2020 e 2024, de modo a garantir a atualização das informações. As palavras-chave utilizadas foram: “resíduos sólidos plásticos”, “cidades inteligentes”, “economia circular”, “tecnologia sustentável” e “baixo custo”.

Foram inicialmente identificadas 80 publicações entre artigos científicos, dissertações e relatórios técnicos. Após a triagem por pertinência temática, ano de publicação e aderência aos critérios de análise, 43 documentos foram selecionados para revisão aprofundada. Destes, 15 tecnologias emergiram como destaque no contexto da gestão de resíduos plásticos. A análise posterior se concentrou em tecnologias classificadas como de baixo custo, segundo critérios de complexidade técnica, necessidade de mão de obra especializada e viabilidade econômica de implementação em contextos urbanos brasileiros.

A classificação das tecnologias seguiu dois parâmetros principais, que foram a aderência aos eixos temáticos das cidades inteligentes, conforme definidos pelo *Ranking Connected Smart Cities* (Urban Systems, 2023) e o custo estimado de implementação, categorizado em baixo, médio e alto, com base na qualificação técnica exigida e na infraestrutura necessária, conforme modelo adaptado de Cheah *et al.* (2022).

As tecnologias de baixo custo analisadas foram avaliadas quanto à sua contribuição para pelo menos quatro dos onze eixos temáticos da Urban Systems, com ênfase nos eixos de meio ambiente, governança, tecnologia e inovação e economia. Este método permitiu não apenas identificar

soluções tecnológicas economicamente viáveis, mas também discutir sua adaptabilidade ao contexto brasileiro, contribuindo para o debate sobre a democratização da inovação nas cidades inteligentes.

Com isso, temos três tecnologias de baixo custo identificadas: reciclagem mecânica, inclusão de catadores no sistema formal e coleta inteligente com sensores simples. O presente trabalho irá apresentar cada uma delas, relacioná-las aos eixos temáticos das cidades inteligentes e discutir sua viabilidade no contexto urbano brasileiro.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A partir da análise dos documentos selecionados, foram identificadas três tecnologias de baixo custo com alto potencial de contribuição para a gestão de resíduos plásticos e alinhamento com os eixos temáticos das cidades inteligentes. Essas tecnologias se destacam por sua viabilidade econômica, relativa simplicidade operacional e capacidade de adaptação à realidade brasileira.

### **4.1 Reciclagem mecânica**

A reciclagem mecânica é uma das formas mais comuns e consolidadas de reaproveitamento de resíduos plásticos. Trata-se de um processo físico que envolve etapas como coleta, triagem, lavagem, trituração e remoldagem do material, sem que haja modificação de sua estrutura química. Esse tipo de reciclagem é amplamente empregado em polímeros como o polietileno tereftalato (PET), o polietileno de alta densidade (Pead) e o polipropileno (PP), devido à sua viabilidade técnica e econômica.

No contexto dos eixos temáticos das cidades inteligentes, a reciclagem mecânica contribui diretamente para os eixos de: a) Meio ambiente: reduz a quantidade de resíduos enviados a aterros e diminui a extração de matérias-primas virgens; b) Economia: gera insumos reciclados para a indústria e reduz custos de produção; c) Empreendedorismo: estimula pequenos negócios e cooperativas de reciclagem; d) Tecnologia e inovação: mesmo com simplicidade técnica, pode ser otimizada com melhorias no processo produtivo.

A principal vantagem desta tecnologia é sua baixa exigência em termos de infraestrutura e de qualificação técnica, o que a torna aplicável mesmo em municípios com menor capacidade de investimento. No entanto, seu sucesso depende da existência de sistemas eficientes de coleta seletiva e da valorização dos materiais reciclados no mercado.

#### **4.2 Inclusão de catadores no sistema formal**

A formalização e a integração de catadores e cooperativas de recicladores no sistema de gestão de resíduos são uma estratégia de baixo custo com alto impacto social e ambiental. Essa abordagem reconhece a importância dos catadores na triagem e na separação de resíduos recicláveis, promovendo a inclusão social, a geração de renda e a eficiência operacional. Os eixos temáticos atendidos incluem: a) Governança: fortalece a participação social e a gestão colaborativa dos resíduos; b) Economia: fomenta a geração de renda e reduz os custos municipais com coleta e triagem; c) Urbanismo: melhora a organização do fluxo de resíduos e contribui para a limpeza urbana; d) Meio ambiente: amplia a taxa de reciclagem e reduz o descarte inadequado; e) Empreendedorismo: estimula a criação de redes cooperativas e negócios sociais.

A inclusão de catadores é considerada uma tecnologia social, pois combina inovação com impacto direto na melhoria das condições de vida de populações historicamente marginalizadas. Sua implementação requer, principalmente, vontade política, capacitação e regulamentação adequada, sendo uma solução de alta relevância para cidades brasileiras de médio e pequeno porte.

#### **4.3 Coleta inteligente com sensores simples**

A coleta inteligente é baseada no uso de sensores para o monitoramento do nível de preenchimento das lixeiras, otimizando rotas e reduzindo custos operacionais. Apesar de estar geralmente associada a soluções de alto custo e tecnologia avançada (como IoT e big data), há versões simplificadas, utilizando sensores de baixo custo e plataformas abertas que permitem sua implementação em escala piloto.

Eixos temáticos atendidos: a) Tecnologia e inovação: melhora a eficiência operacional da coleta por meio do uso racional de tecnologia; b) Meio ambiente: evita transbordamentos e reduz a emissão de CO<sub>2</sub> com rotas otimizadas; c) Governança: permite maior transparência e controle do serviço de coleta; d) Energia: reduz o consumo de combustível com um planejamento logístico mais eficiente.

Sua adoção inicial pode ser feita em áreas-piloto, com expansão gradual conforme os resultados. Para cidades com capacidade técnica limitada, parcerias com universidades, startups locais ou programas de extensão tecnológica podem viabilizar essa inovação de forma progressiva e economicamente viável.

#### 4.4 Síntese das contribuições

Tabela 1 – Tecnologias de Gestão de Resíduos: Custos e Potencial de Aplicação

<b>Tecnologia</b>	<b>Custo</b>	<b>Eixos Atendidos</b>	<b>Potencial no Brasil</b>
Reciclagem Mecânica	Baixo	Meio Ambiente, Economia, Empreendedorismo, Inovação	Alta
Inclusão de Catadores	Baixo	Governança, Meio Ambiente, Urbanismo, Economia, Empreendedorismo	Alta
Coleta Inteligente	Baixo	Tecnologia, Meio Ambiente, Governança, Energia	Moderada a alta (via parcerias)

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apontam que tecnologias de baixo custo, quando alinhadas a políticas públicas e estratégias, podem oferecer respostas eficazes aos desafios urbanos, promovendo simultaneamente sustentabilidade, eficiência e justiça social — elementos essenciais na construção de cidades verdadeiramente inteligentes.

A adoção de tecnologias de baixo custo na gestão de resíduos sólidos se apresenta como uma alternativa estratégica, especialmente em contextos urbanos com recursos financeiros e infraestrutura limitados.

Nessa perspectiva, tecnologias apropriadas devem ser compatíveis com as condições socioeconômicas, culturais e ambientais de cada território, priorizando ações de redução, reutilização e reciclagem dos resíduos. Além de demandarem menores investimentos iniciais, essas soluções favorecem sua replicação em diferentes contextos municipais, ampliando a viabilidade de implementação de programas de gestão integrada dos resíduos sólidos (Santiago; Dias, 2012).

Além disso, tecnologias acessíveis favorecem a descentralização da gestão, promovendo maior envolvimento comunitário e fortalecendo práticas locais de sustentabilidade (IPEA, 2020). Isso é particularmente relevante no Brasil, onde mais de 80% dos municípios têm população inferior a 50 mil habitantes (IBGE, 2021) e enfrentam limitações técnicas e administrativas para implementar soluções de alta complexidade tecnológica.

Outro ponto de destaque é a sinergia com políticas públicas de inclusão social. A inclusão de catadores, por exemplo, beneficia-se de tecnologias simples para a triagem, o transporte e a comercialização de recicláveis, criando oportunidades de renda e fortalecendo a economia circular (Souza; Oliveira; Andrade, 2023). Segundo a Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT, 2023), investimentos em soluções de baixo custo e em capacitação técnica ampliam significativamente a eficiência e a segurança das cooperativas.

Por fim, tecnologias de menor custo tendem a ser mais sustentáveis a longo prazo, pois requerem menos manutenção especializada, consomem menos energia e geram menor volume de rejeitos. Essa abordagem está alinhada com os princípios da economia circular e da sustentabilidade urbana, preconizados na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que enfatiza a adequação tecnológica à realidade local como um dos pilares da efetividade da gestão integrada.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este artigo buscou analisar tecnologias de baixo custo para a gestão de resíduos plásticos como estratégias viáveis para o desenvolvimento de cidades inteligentes, especialmente no contexto brasileiro. A partir de

uma revisão de literatura, foram identificadas quatro tecnologias com alto potencial de impacto positivo e adaptabilidade à realidade urbana do país: reciclagem mecânica, inclusão de catadores no sistema formal e coleta inteligente com sensores simples.

Essas soluções se destacam por exigirem infraestrutura mínima, mão de obra pouco especializada e investimentos iniciais acessíveis, sem deixar de atender a múltiplos eixos temáticos fundamentais das cidades inteligentes, como meio ambiente, governança, economia, inovação e energia. Além disso, contribuem para o avanço da economia circular, promovem inclusão social e fortalecem a capacidade dos municípios de gerenciar seus resíduos de forma mais eficiente e sustentável.

Constatou-se que, embora o debate sobre cidades inteligentes frequentemente esteja atrelado a tecnologias de alta complexidade, há espaço para inovações simples e eficazes, que podem ser aplicadas mesmo em cidades com restrições financeiras e estruturais. Para isso, é fundamental o envolvimento do poder público na criação de políticas de incentivo e de programas de capacitação profissional, bem como no estabelecimento de parcerias interinstitucionais com universidades, cooperativas, organizações não governamentais (ONGs) e setor privado.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a realização de estudos de caso empíricos sobre a implementação dessas tecnologias em cidades brasileiras, bem como análises comparativas entre diferentes modelos de gestão de resíduos baseados em soluções de baixo custo. Além disso, é relevante investigar os impactos socioeconômicos de longo prazo dessas tecnologias e o papel das comunidades em sua sustentabilidade.

Dessa forma, conclui-se que o caminho para cidades verdadeiramente inteligentes passa não apenas pela adoção de tecnologias de ponta, mas, sobretudo, pela valorização de soluções acessíveis, sustentáveis e inclusivas, que dialoguem com a realidade dos territórios e promovam transformação social e ambiental efetiva.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CATADORES E CATADORAS DE MATERIAIS RECICLÁVEIS (ANCAT). Relatório Anual de Atividades, *ANCAT*, [S. l.], 2023.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2010.

CARVALHO, D. A.; GONÇALVES, A. T. P. Contribuições da logística reversa na sustentabilidade de uma empresa de acumuladores elétricos. revista livre de sustentabilidade e empreendedorismo. *Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo*, [S. l.], v. 8 n. 6, 2023.

CHEAH, L. *et al.* Cost analysis and workforce considerations in waste recycling systems. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 335, 130279, 2022.

COELHO, J. A.; BRITTO, A. L. Tecnologias sociais e gestão de resíduos sólidos urbanos: caminhos para sustentabilidade em pequenos municípios. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 134–153, 2020.

DIAS, S. M. Economia circular e inclusão social: o papel dos catadores de materiais recicláveis. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 234-249, 2019.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Economia circular na América Latina e no Caribe: uma visão compartilhada. [S. l.]: Circular Economy Coalition, 2022

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Completing the picture: how the circular economy tackles climate change. *Ellen Macarthur Foundation*, [S. l.], 2020.

ENGIE. O que são cidades inteligentes e como elas formam o futuro sustentável. *Além da Energia*, [S. l.], 2023. Disponível em: [https://www.alemdaenergia.engie.com.br/o-que-sao-cidades-inteligentes-e-como-elas-formam-o-futuro-sustentavel/?gclid=EAlaIqobChMIw6SfxNeTgQMVmEFIAB2mZAtQEAAAYASAAEgKNwfd\\_BwE](https://www.alemdaenergia.engie.com.br/o-que-sao-cidades-inteligentes-e-como-elas-formam-o-futuro-sustentavel/?gclid=EAlaIqobChMIw6SfxNeTgQMVmEFIAB2mZAtQEAAAYASAAEgKNwfd_BwE). Acesso em: 16 maio 2024.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, [S. l.], v. 3, n. 7, e1700782, 2017.

GIFFINGER, R.; HAINDL, G. *Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of cities?* Vienna: Vienna University of Technology, 2010.

HALL, R. E. The vision of a smart city. In: INTERNATIONAL LIFE EXTENSION TECHNOLOGY WORKSHOP, 2., Paris. *Proceedings* [...]. Paris: Brookhaven National Laboratory, 2000.

IBGE. *Perfil dos Municípios Brasileiros: 2020*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IPEA. *Desenvolvimento local e gestão de resíduos: uma abordagem socioeconômica*. Brasília: IPEA, 2020.

MARCHI, C. M. D. F. Novas perspectivas na gestão do saneamento: apresentação de um modelo de destinação final de resíduos sólidos urbanos. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 91-105, jan. 2015.

MULGAN, G. *Social Innovation: what it is, why it matters and how it can be accelerated*. Oxford: University of Oxford, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *United Nations*, New York, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 18 jun. 2026.

PRAHALAD, C. K. *The Fortune at the bottom of the pyramid: eradicating poverty through profits*. [S. l.]: Wharton School Publishing, 2005.

RADJOU, N.; PRABHU, J.; AHUJA, S. Jugaad Innovation: think frugal, be flexible, generate breakthrough growth. [S. l.]: Jossey-Bass, 2012.

SANTIAGO, L. S.; DIAS, S. M. F. Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 203-212, abr. 2012.

SILVA, J. P. B.; MARCHI, C. M. D. F. Tecnologias de baixo custo e sustentabilidade urbana no contexto das cidades inteligentes. In: SEMANA DE MOBILIZAÇÃO CIENTÍFICA (SEMOC): CUIDAR DO OUTRO PARA CUIDAR DO MUNDO, 27., 2024, Salvador. *Anais [...]*. Salvador: UCSAL, 2024.

SOUZA, R.; OLIVEIRA, L.; ANDRADE, D. Catadores e a economia circular: inclusão social e sustentabilidade na prática. *Revista Ciências Ambientais*, [S. l.], 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *The heat is on – A world of climate promises not yet delivered*. [Emissions Gap Report 2021]. Nairobi: UNEP; 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>. Acesso em: 19 jun. 2026

UN-HABITAT. Building partnerships to enhance resource recovery around the world. *UN-HABITAT*, Nairobi, 2022.

URBAN SYSTEMS. Ranking Connected Smart Cities. *Urban Systems*, [S. l.], 2023.

Disponível em: <https://www.connectedsmartcities.com.br/ranking/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). *The Global Risks Report 2020*. [Insight Report (15th Edition). In partnership with Marsh & McLennan and Zurich Insurance Group]. [S. l.]: WEF, 2020. Disponível em: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risk\\_Report\\_2020.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf). Acesso em: 19 jun. 2026

