

REVOLUÇÃO SUSTENTÁVEL: COMO A AUTOMAÇÃO PODE TRANSFORMAR A INDÚSTRIA DE RECICLAGEM RUMO À SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Luigi da Silva Rencelj, Ana Cláudia Souza Vidal de Negreiros

Resumo: A reciclagem tornou-se um assunto comum quando se pensa em conservação e preservação do meio ambiente. Este estudo explora o impacto da automação na indústria de reciclagem e sua contribuição para a promoção de práticas sustentáveis. Por meio de uma revisão da literatura densa e estruturada, esta pesquisa buscou evidenciar como a integração de tecnologias avançadas melhora processos essenciais, como a triagem, a separação de resíduos e a transformação de materiais recicláveis, alcançando maior eficiência operacional, redução de desperdícios e mitigação dos impactos ambientais. Os resultados demonstram que a automação é um elemento estratégico para fortalecer a sustentabilidade na gestão de resíduos, posicionando-se como uma solução fundamental para preservar recursos naturais e enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, além de preparar o mundo para as futuras gerações.

Palavras-chave: Reciclagem; automação. integração de tecnologias, impactos ambientais.

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem e a gestão de resíduos desempenham papéis fundamentais na redução da pegada de carbono e na conservação de recursos naturais. Isso ocorre porque acontece a redução de emissões de carbono, tendo em vista que a reciclagem diminui a necessidade de produção por meio da utilização de materiais virgens, o que reduz as emissões de gases de efeito estufa associadas a processos industriais e mineração. Além disso, esta prática também auxilia na conservação de recursos, pois o ato de reciclar faz com que haja uma economia de importantes recursos, como metais, plásticos e papel, contribuindo para a preservação de matérias-primas finitas e para a diminuição da poluição [1].

Nesse sentido, uma gestão eficaz de resíduos sólidos previne a poluição do solo, da água e do ar, tal prevenção traz benefícios para a saúde humana e para o meio ambiente de forma geral [2]. Grandes tragédias ambientais fazem com que a percepção humana se volte para a necessidade de cuidar e preservar o meio ambiente em que vivemos. Como exemplo tem-se a tragédia ambiental ocorrida em dezembro de 2023, quando o estado brasileiro do Rio Grande do Sul começou a vivenciar períodos de chuva em grande magnitude que adentraram o ano de 2024 persistindo de forma instável. Essas chuvas trouxeram consequências catastróficas como enchentes e deslizamentos de terra, descargas elétricas e eventuais quedas de granizo, além de riscos hidrológicos em todo o seu território [3], resultando em prejuízos à infraestrutura local e o acúmulo de resíduos em grandes volumes, evidenciando a fragilidade da sociedade e como é de suma importância a implementação de sistemas eficazes capazes de gerir com eficiência os RSUs (Resíduos Sólidos Urbanos) [4]. Portanto, a automação e suas tecnologias quando implementadas à reutilização de materiais, surgem como uma solução capaz de lidar com os desafios próprios supracitados, trazendo resultados como sustentabilidade e a contenção em meio aos desastres naturais.

Recentemente, algumas revisões da literatura ratificaram a importância da reciclagem e do cuidado constante com o meio ambiente global. No estudo de Dan Cudjoe, Hong Wang e Bangzhu Zhu [5] percebe-se que a reciclagem de resíduos sólidos traz potenciais benefícios energéticos e ambientais no contexto analisado, no caso de pesquisa do autor, a China. Nesse estudo, devido ao esgotamento de recursos e a necessidade de crescimento econômico sustentável, adotou-se a reciclagem como uma questão de suma importância para a conservação de recursos e proteção ambiental. Com isso, os resultados obtidos com a pesquisa e experimentação resultaram em 43,2 % de economia e eletricidade, além de evitar 4.765,9 bilhões de kg de emissão de dióxido de carbono e 22,502 bilhões de kg de emissão de metano. Já o estudo de R. Ahirwar e A. Tripathi [6] traz uma revisão do processo de reciclagem dos resíduos eletrônicos, os riscos ambientais, os problemas de saúde ocupacional e as soluções para estes problemas. Segundo os autores, o crescimento exponencial de resíduos eletrônicos, conhecidos como *e-waste*, no que compreende os equipamentos eletrônicos e elétricos no fim de sua vida útil, surgem como uma grande preocupação ambiental, devido ao descarte irregular. Assim, a reciclagem destes materiais é necessária para minimizar a crescente quantidade desse material. E o trabalho desenvolvido por Y. Fan et.al [7] mostra que a redução do desperdício de plástico é uma prática crucial para mitigar os impactos ambientais negativos, especialmente o potencial de aquecimento global e a poluição marinha. O estudo em questão busca por meio de um modelo de rede neural prever a geração de resíduos e avaliar as intervenções que podem mitigar os impactos causados pelos resíduos plásticos no meio ambiente.

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da automação na indústria de reciclagem e sua contribuição para a sustentabilidade ambiental. A automação, ao ser incorporada na gestão de resíduos, oferece maior eficiência na coleta, separação e reaproveitamento dos materiais recicláveis, além de otimizar processos, reduzir custos e minimizar riscos para a saúde e segurança dos trabalhadores. O estudo foca em objetivos específicos, como a análise da produção de resíduos no Brasil, a avaliação dos impactos ambientais das atividades humanas e a investigação do papel da automação na gestão de resíduos.

Além disso, o modelo de sustentabilidade e inovação tecnológica de Singapura foi adotado como referência devido à sua abordagem exemplar no combate à poluição e na preservação ambiental. Singapura implementou sistemas automatizados avançados para a gestão de resíduos urbanos, criando um modelo que integra políticas públicas eficazes com tecnologias sustentáveis, contribuindo para a criação de um ciclo de economia circular e aumentando as taxas de reciclagem. O objetivo é aplicar lições globais que possam impulsionar o crescimento econômico saudável, gerar empregos no eco indústria e promover uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável, alinhada às necessidades do Brasil.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PRODUÇÃO DE LIXO NO BRASIL: ANÁLISE REGIONAL E PER CAPITA

Com aproximadamente 203,1 milhões de habitantes [8], o Brasil em comparação a outros países do globo, ocupa o quarto lugar entre os que mais geram resíduos sólidos plásticos no mundo. De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), entre 2012 e 2021, houve um aumento significativo na importação de resíduos sólidos para o país, que subiu de 4,12 mil toneladas para 8,62 mil toneladas [9]. Estes materiais deveriam, mediante a legislação e as tecnologias disponíveis, receber tratamento adequado de descarte, separação e reutilização, porém, estes acabam sendo descartados de forma inadequada, não recebem a separação devida para auxílio de gestão do lixo e não resultam na reutilização destes para o favorecimento da reciclagem e sustentabilidade ambiental [10].

Devido à má conduta brasileira, a cada período, o brasileiro produz cada vez mais lixo, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública [11], o brasileiro produz aproximadamente 1,52 milhão de toneladas de lixo por semana, destes resíduos, 11,3 milhões de toneladas são de material plástico, onde apenas 1,3% passaram pelo processo de reciclagem. Estes dados nos colocam como o quarto maior produtor de lixo plástico do mundo, estando abaixo na classificação dos Estados Unidos da América, China e Índia [12]. No que diz respeito à cobertura de coleta de resíduos sólidos, os levantamentos mostram que em 2022, 93% da população brasileira foram atendidas por esse serviço, porém, os 7% restantes no qual não receberam atendimento, apesar da baixa porcentagem, representam uma parcela populacional maior que países como a Bélgica, portanto, vê-se que existem ainda uma fração de pessoas sem proteção à saúde pública e ao meio ambiente. Ainda, tal fato se agrava quando consideramos que 39% dos resíduos coletados no Brasil são destinados para áreas inadequadas de descarte [13].

Apesar das iniciativas trazidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os dados abordados indicam que ainda não se tem o correto manejo dos resíduos como determinado por Lei [14]. Além disso, os levantamentos trazem a realidade de que é necessário avançar para atingir a total abrangência no país.

2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS DAS AÇÕES HUMANAS NO MÉDIO E LONGO PRAZO

As consequências das más atitudes da humanidade na natureza geram impactos ambientais em todo o ecossistema, esses resultados negativos provêm de ações como o descarte incorreto de materiais plásticos, de papel e de outros componentes, a poluição de rios e mares por meio do despejo de líquidos poluentes etc. Para se compreender adequadamente a respeito das consequências das ações humanas no meio ambiente, é necessário ter a ciência sobre as definições do estudo abordado, para que assim haja uma análise das consequências e se possa elaborar ações para a correção ou diminuição dos impactos ambientais. Segundo a ISO 14001-2004, os impactos ambientais se caracterizam como qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, da organização e dos aspectos ambientais [15]. Quando consulta-se o Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente) em sua resolução 001/86 – CONAMA, define-se o impacto ambiental como sendo “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais” [16]. Vale ressaltar que o termo “impacto ambiental” se refere de forma exclusiva aos efeitos causados no meio ambiente devido a ação humana, então, ocorridos como enchentes, tempestades e outros, não são caracterizados como impacto ambiental, apesar de causarem alterações na infraestrutura civil e do meio ambiente [17].

Os impactos ambientais por serem o resultado das ações humanas e naturais sobre o meio ambiente, carregam em si efeitos de caráter positivo ou negativo, a depender dos movimentos realizados no ecossistema, onde estes afetam desde ecossistemas locais até toda a extensão planetária [18]. Por conta disso, os impactos ambientais se dividem em diferentes categorias, cada uma com sua forma específica de modificar o ambiente afetado, tais

resultados dessa modificação dependem da magnitude da ação e do efeito provocado, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1. Impactos Ambientais e Suas Categorias. (Autoria Própria).

Impactos	Conceitos
Atmosférico	Resultam das emissões de poluentes de processos industriais e veículos motorizados, contribuindo para a poluição do ar e mudanças climáticas [19].
Hídricos	Resultam da poluição da água por resíduos industriais, esgotos domésticos e pesticidas agrícolas, comprometendo a pureza da água e sua qualidade para consumo humano [20].
Terrestres	São causados por atividades como extração de madeira e mineração, que resultam na perda de habitat natural, compactação do solo e diminuição da infiltração de água, prejudicando ecossistemas e produtividade agrícola [21].
Biodiversidade	Resultam da conversão de áreas naturais em urbanas, agrícolas e ambientais, causando perda de habitat, extinção de espécies e diminuição da diversidade biológica [22].
Saúde Humana	Envolvem doenças relacionadas ao clima, alergias, vetores e falta de água potável, causadas por poluentes atmosféricos, produtos químicos tóxicos e água contaminada, resultando em doenças respiratórias, dermatológicas e gastrointestinais [23].
Socioeconômicos	Resultam de desastres naturais relacionados à poluição, mudanças climáticas e degradação ambiental, levando ao deslocamento de comunidades e perda de meios de subsistência, recursos naturais e terras devido a grandes projetos de infraestrutura [24].

Os impactos ambientais devido sua gravidade e abrangência, causam consequências em todas as áreas da humanidade, como a saúde, a atmosfera, a economia, a biodiversidade etc. Tais resultados nos mostram a urgência em tomar ações de precaução e cuidado ambiental, para que sejam evitadas as perdas, mudanças, poluição e tudo que compromete a evolução humana. Tais conceitos já foram ouvidos e discutidos por órgãos de competência com a ONU (Organização das Nações Unidas) e a OMS (Organização Mundial da Saúde) [25]. Por isso abordar as consequências das ações humanas no meio ambiente é de suma importância, como trazido no Quadro 2.

Quadro 2. Consequências das Ações Humanas no Meio Ambiente e Seus Conceitos. (Autoria Própria).

Consequências	Conceitos
Mudanças Climáticas	Resultam da emissão de gases poluentes, como CO ₂ , provenientes de atividades humanas como queima de combustíveis fósseis e desmatamento, contribuindo para o aumento da temperatura global, nível do mar e eventos climáticos mais intensos [26].
Perda de Biodiversidade	Resultam da poluição causada pelo descarte inadequado, destruindo habitats naturais e levando à perda de biodiversidade, afetando serviços ecossistêmicos como polinização, regulação climática e controle de pragas [27].
Poluição Ambiental	Resultam da emissão e descarte inadequado de lixo, causando poluição do ar, água e solo, afetando a saúde humana e a preservação da fauna e flora. Exemplos incluem doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer, além de contaminação de fontes de água potável [28].
Esgotamento dos Recursos Naturais	Impactos do uso insustentável de recursos naturais resultam no esgotamento de bens vitais como água, minérios e florestas, causando escassez e conflitos para uso e distribuição, com graves consequências para o futuro e gerações vindouras [29].

Estas consequências são temas de debate em diversos órgãos políticos que se preocupam com a sustentabilidade ambiental do planeta, tais resultados da ação humana citados acima foram debatidos no Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) [30].

2.3. RECICLAGEM COMO ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Com relação à reciclagem e redução de resíduos, podemos destacar três pontos onde há o avanço sustentável, como: a diminuição do volume de resíduos, a preservação de recursos naturais e a redução da poluição [31]. Tais conceitos nos ajudam a compreender como a reciclagem é trabalhada e quais os seus resultados, fazendo-nos entender sua importância, como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3. Reciclagem e Seu Avanço Sustentável. (Autoria Própria).

Consequências	Conceitos
----------------------	------------------

Diminuição do Volume de Resíduos	A reciclagem de materiais como papel, metal, vidro e plástico reduz a quantidade de resíduos em aterros e incineradores, economizando espaço e minimizando impactos ambientais [32].
Preservação de Recursos Naturais	A reciclagem diminui a necessidade de extração e processamento de matérias-primas virgens, poupando recursos naturais e reduzindo o impacto ambiental [33].
Redução da Poluição	A reciclagem gera menos poluição que a produção de materiais novos a partir de matérias-primas virgens, resultando em menos gases de efeito estufa, menos poluição da água e do solo, e menor consumo energético [34].

Mediante isto, é notório a contribuição que a reciclagem oferece quando se a utiliza, além do quê, sua colaboração é muito mais ampla, atingindo aspectos econômicos.

2.4 ASPECTOS ECONÔMICOS DA RECICLAGEM

No que diz respeito aos aspectos econômicos relacionados a reciclagem, alguns pontos são levados em consideração para o bom resultado de sua adesão, os quais são emprego, renda - relacionando-os a necessidade empregatícia presente no Brasil [35], a fim de contribuir com a geração de trabalhos formais e justamente remunerados – e economia, apontando a redução de custos e valorização de materiais reciclados, como apresentado pelo Quadro 4.

Quadro 4. Aspectos Econômicos da Reciclagem. (Autoria Própria).

Aspectos	Conceitos
Geração de Emprego e Renda	A reutilização de RSU gera atividades remuneradas diretas devido às várias etapas da reciclagem [36].
Economia Circular	Visa manter produtos, recursos e materiais em uso pelo maior tempo possível, extraindo o máximo valor e recuperando-os no fim de sua vida útil [37].
Redução de Custos Ambientais	A reciclagem consome menos água e energia em comparação com a produção de novos materiais [38].
Desafios Econômicos	Incluem os custos iniciais de implementação do sistema sustentável, além da necessidade de conformidade com normas [39].
Incentivos Econômicos e Subsídios	Promovem a reciclagem por meio de subsídios, incentivos fiscais e tarifas, como a trazida pela Lei de Incentivo à Reciclagem (LIR) [40].

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão da literatura. Conforme o autor Snyder [41], uma revisão da literatura é um método de pesquisa essencial para mapear o estado da arte de determinado campo de estudo, proporcionando subsídios teóricos e práticos para embasar análises e discussões. Adicionalmente, a pesquisa adota uma abordagem qualitativa, que, segundo Creswell [42], é adequada para explorar fenômenos complexos, buscando compreender os significados atribuídos pelos indivíduos ou pelas práticas sociais em determinado contexto. Essa escolha é justificada pela necessidade de explorar as interações entre automação e gestão de resíduos, considerando não apenas os números e resultados técnicos, mas também os impactos sociais, tecnológicos e ambientais relacionados.

No que tange à natureza exploratória, o estudo visa ampliar o conhecimento sobre um campo ainda em desenvolvimento no Brasil, conforme descrito por Gil [43], que define a pesquisa exploratória como aquela que proporciona maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses.

Por fim, o caráter descritivo desta pesquisa é evidenciado pela detalhada análise das aplicações da automação no setor de reciclagem, incluindo a triagem de resíduos, a separação automatizada e a reutilização de materiais recicláveis. Segundo Vergara [44], a pesquisa descritiva tem como principal objetivo descrever as características de um fenômeno ou uma realidade, detalhando seus componentes e interações de forma clara e sistemática. Assim, o estudo apresenta um panorama detalhado sobre como a automação pode transformar os processos de reciclagem.

Numa perspectiva mais pormenorizada, neste estudo utilizou-se diversas ferramentas atualizadas e abrangentes sobre o tema proposto como o Google Acadêmico, o JSTOR e o Science Direct, além da leitura minuciosa de artigos científicos, sites especializados e documentos corroborados com o tema trabalhado. Este trabalho teve como alvo a população brasileira em sua totalidade, não necessitando a aplicação de amostras, pois a pesquisa se baseia na análise de dados disponíveis na literatura.

3.2 ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DO TRABALHO

Para a construção deste Trabalho de Conclusão de Curso, foi fundamental a aplicação de um procedimento sistemático e eficaz de coleta e análise de dados, adequado à natureza exploratória e qualitativa da pesquisa. O passo a passo de construção desta pesquisa é mostrado na Figura 1, onde têm-se do processo inicial à conclusão e proposição de soluções, utilizando-se dos estudos de Lakatos e Marconi [45] e Severino [46].

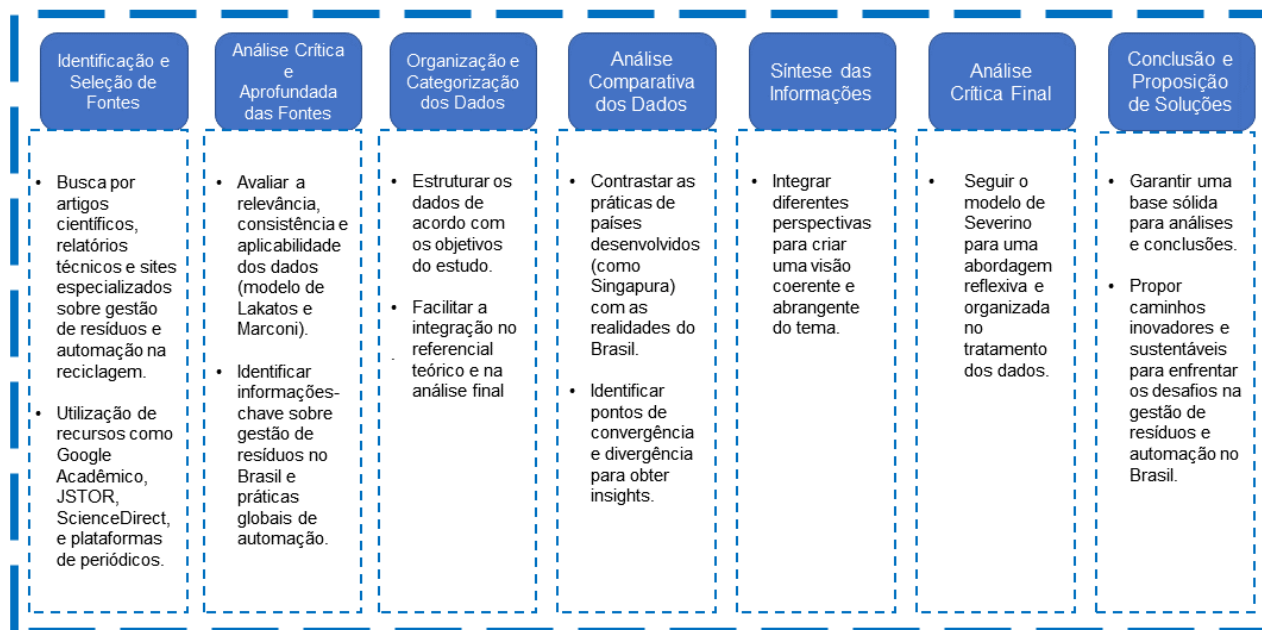


Figura 1. Metodologia utilizada nesta pesquisa. (Autoria Própria)

Esse rigor metodológico garantiu que a pesquisa fosse conduzida de forma confiável e abrangente, fornecendo uma base sólida para as análises e conclusões apresentadas neste trabalho. Assim, foi possível não apenas compreender a situação atual da gestão de resíduos e automação no Brasil, mas também propor caminhos inovadores e sustentáveis para enfrentar os desafios identificados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise dos dados sobre resíduos sólidos no Brasil e no mundo, verificou-se que a geração de resíduos sólidos urbanos tem aumentado de forma acelerada. Esse cenário evidencia a necessidade de adoção de medidas mais eficazes para mitigar os impactos ambientais e minimizar o acúmulo de resíduos, alinhando práticas sustentáveis aos desafios contemporâneos.

No contexto brasileiro, os dados apresentados revelam grandes desafios no manejo de resíduos sólidos urbanos. Conforme apontam estudos do autor Helder Carvalho [47], o Brasil enfrenta dificuldades significativas, como práticas inadequadas de descarte, ausência de infraestrutura eficiente e altos custos de armazenamento. Por isso, o Quadro 5 apresenta os resultados obtidos nas análises de quatro desafios propostos mediante a revisão da literatura e quatro soluções adotadas pela República de Singapura, a fim de eliminar tais dificuldades em seu país. Singapura foi escolhida para essa comparação porque é uma das referências no manejo correto de resíduos sólidos.

Quadro 5. Desafios para a Gestão de Resíduos no Brasil e soluções tomadas por Singapura. (Autoria Própria).

Desafios	Brasil	Possíveis Soluções	Singapura
Aumento na Geração de Resíduos	O aumento de resíduos sólidos no Brasil é acelerado, com 79,4 milhões de toneladas de RSU em 2020 [48].	Melhoria Contínua na Gestão de Resíduos	Singapura enfrenta limitações de espaço, com uma geração de resíduos que exige inovação constante em gestão [49].
Práticas de Descarte e Problemas Ambientais	Práticas inadequadas de descarte ainda predominam em muitas regiões do Brasil [50].	Modelos Sustentáveis de Gestão de Resíduos	Têm-se o uso de aterros sanitários no mar, além de práticas de incineração e reutilização de resíduos [51].
Limitações para o Aumento da Reciclagem	A reciclagem no Brasil ainda é limitada, mas há		Singapura adota a meta de atingir 70% de taxa de reciclagem até 2030 [53].

	avanços como o Programa Lixão Zero [52].	Modelo de Reciclagem Sofisticado	
Tecnologia e Inovação na Gestão de Resíduos	O uso de tecnologias é crescente no Brasil, mas sua implementação é desigual [54].	Liderança, Inovação e Tecnologia	Singapura é líder em inovação tecnológica na gestão de resíduos [55].

Ao analisar o Quadro 5 percebe-se que dentre os desafios encontrados no Brasil, encontra-se uma solução dotada por Singapura a respeito deste problema. A escolha por Singapura como modelo é justificada por sua abordagem integrada e eficaz, que alia políticas públicas consistentes com tecnologias avançadas, visando a sustentabilidade e a melhoria na gestão de resíduos. Com isso, pode-se utilizar as medidas utilizadas por esta República para obter êxito na implementação da automação nos processos produtivos da indústria de reciclagem.

Mediante os tópicos apresentados, o quadro evidencia os contrastes entre Brasil e Singapura na gestão de resíduos sólidos, destacando desafios e soluções em cada contexto. Enquanto no Brasil se enfrenta limitações estruturais e culturais, Singapura vem despontando como um exemplo de inovação e eficiência. A análise mostra que a aplicação de tecnologias avançadas, mesmo mediante seus custos, se faz aliada às políticas públicas consistentes, podendo ser a chave para transformar o setor de resíduos no Brasil. Esse modelo não só combate a poluição, mas também impulsiona a economia circular e a reciclagem, sendo um exemplo de como as tecnologias podem ser aliadas ao desenvolvimento sustentável.

Com o intuito de trazer de forma clara e objetiva os conceitos que foram abordados por meio do Quadro 5, que traz consigo o foco nos “Desafios para a Gestão de Resíduos no Brasil e Soluções Tomadas por Singapura”, o Quadro 6 busca apresentar os “Aspectos da Automação na Indústria de Reciclagem e sua Contribuição” com o objetivo de mostrar todas as etapas trabalhadas quando se adere a tecnologia nos sistemas de gestão de resíduos e também mostrando que esta pesquisa atende o objetivo estabelecido pela mesma.

Quadro 6. Aspectos da Automação na Indústria de Reciclagem e sua Contribuição. (Autoria Própria)

Aspectos	Desafios	Contribuições	Aplicação
Triagem de Resíduos	Alta demanda de mão de obra e erros na separação manual [56].	Sensores ópticos e robôs aceleram o processo e aumentam a precisão [57].	Máquinas de triagem automática utilizadas em países como Singapura. [58].
Separação de Materiais	Dificuldade em separar materiais semelhantes (ex.: plásticos de diferentes tipos) [59].	Tecnologias como espectroscopia e inteligência artificial otimizam a separação [60].	Sistemas baseados em tecnologias de marcação para separar plásticos PET e HDPE [61].
Monitoramento de Resíduos	Falta de dados precisos sobre volume e tipo de resíduos gerados [62].	Uso de IoT para coleta de dados em tempo real [63].	Sensores conectados para monitoramentos inteligentes [64].
Reciclagem Química e Mecânica	Alto custo energético e perda de qualidade no processamento tradicional [65].	Sistemas automatizados que reduzem custos e melhoram a qualidade do material reciclado [66].	Processos automatizados de reciclagem de metais em países da América Latina [67].
Eficiência Energética no Processo	Elevado consumo de energia nas etapas de reciclagem industrial [68].	Automação reduz desperdícios e otimiza o uso de energia nas máquinas [69].	Fábricas automatizadas em Singapura com recuperação de calor residual [70].
Gestão Logística	Dificuldade no transporte e armazenamento de resíduos [71].	Sistemas automatizados de roteirização e gestão de estoques [72].	Aplicação de logística inteligente no transporte [73].
Educação e Conscientização	Baixa adesão a práticas de reciclagem por parte da população [74].	Plataformas digitais automatizadas para engajamento e educação ambiental [75].	Incentivos a reciclagem em comunidades locais [76].

A reciclagem é um dos pilares fundamentais para a construção de um modelo sustentável de desenvolvimento nos países que enfrentam crises ambientais e as consequências dos problemas desta natureza, principalmente devido ao crescente volume de resíduos gerados em todo o planeta. No entanto, a eficácia desse processo depende de diversos fatores organizados em linha onde apliquem em seu sistema uma abordagem integrada que abranja desde a coleta seletiva até a transformação final dos materiais. Como apresenta o Quadro 6, a automação tem

desempenhado um papel fundamental nessa cadeia, pois sua tecnologia traz avanços significativos para superar os desafios históricos, como a triagem manual de materiais, o consumo energético elevado por causa do trabalho desenvolvido e a baixa adesão por parte da população, seja por questões culturais ou ausência de informação. O Quadro 6 apresentado oferece uma visão de forma estruturada sobre os principais aspectos relacionados à automação dos processos produtivos de reciclagem, abordando os desafios enfrentados, as contribuições das inovações tecnológicas e as aplicações práticas possíveis em diferentes contextos.

Os temas explanados no Quadro 6 abrangem desde a Triagem de Resíduos até a Educação e Conscientização, destacando como as soluções baseadas em inteligência artificial, IoT, sensores conectados e automação avançada podem modificar partes significativas da indústria, como pode-se atestar pelos exemplos mostrados, vem transformando. Além disso, a integração de sistemas tecnológicos, que trazem desde o monitoramento inteligente aos sistemas logísticos otimizados, demonstra que a junção de tecnologias permite uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos. Essas iniciativas, já aplicadas em países como a República de Singapura, oferece um panorama das possibilidades possíveis e desafios prováveis na construção de uma economia circular. O Quadro 6, portanto, não busca apenas ilustrar a complexidade do tema, mas também traz consigo a necessidade de reflexão sobre a importância de adotar estratégias eficientes para o combate as ações de prejuízo ao meio ambiente, e as adoções tecnológicas e educacionais demonstram que é possível impulsionar a sustentabilidade ambiental.

Ao analisar o Quadro 6, pode-se observar que apesar dos desafios encontrados no Brasil no que dizem respeito a geração de RSUs encontra-se uma solução proveniente da automação de processos, tecnologia no qual já adotada por Singapura. Com isso, por meio da comparação de dados, consegue-se perceber soluções para as situações adversas, tendo como auxílio as contribuições da tecnologia. Assim, torna-se possível a aplicabilidade de ferramentas de inovação nas diversas regiões do país, trazendo progresso sustentável e qualidade de vida.

Ainda que a gestão de resíduos seja um problema global, há países que se destacam com exemplos de boas práticas, como Singapura. Essas nações utilizam estratégias como incentivos econômicos para empresas e cidadãos, tecnologias avançadas de triagem automatizada e a adoção de princípios da economia circular, resultando em taxas de reciclagem significativamente maiores e na redução do impacto ambiental. Esses modelos reforçam que a combinação de inovação tecnológica e governança eficiente podem transformar a gestão de resíduos em uma oportunidade econômica e ambiental.

4.1 DESAFIOS E LIMITAÇÕES DA RECICLAGEM

Apesar da reciclagem se mostrar como um caminho para o progresso sustentável, com a reutilização de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) e redução do impacto ambiental causado pelo acúmulo de lixo, existem desafios que surgem em sua adoção e que devem ser conhecidos, por conta disso o Quadro 7 traz informações relacionadas para que por meio do planejamento estratégico haja a sua mitigação.

Quadro 7. Desafios e Limitações da Reutilização de Resíduos. (Autoria Própria)

Desafios Logísticos e Infraestrutura Limitada	
Coleta Seletiva e Armazenamento	Transporte e Custos Associados
A coleta seletiva em muitas cidades brasileiras enfrenta dificuldades devido à falta de um sistema eficiente, resultando-se num desperdício de materiais recicláveis que são descartados em aterros sanitários [77].	É custoso e logisticamente desafiador devido à localização das instalações, fazendo com que se eleve os custos de reciclagem [78].
Dificuldades na Triagem e Separação de Materiais	
Contaminação dos Resíduos	Complexidade de Separação
O descarte de RSU juntamente com materiais inadequados, contamina-os e torna o processo de reciclagem mais lento, complexo e caro [79].	Materiais como embalagens de multicamadas e plásticos variados são difíceis de separar manualmente e exigem tecnologia avançada [80].
Limitações Tecnológicas e Necessidade de Inovação	
Falta de Investimento em Automação	Processamento Inadequado
A automação otimiza os processos de reciclagem, mas exige grandes investimentos [81].	As tecnologias atuais podem ser limitadas no tratamento de resíduos complexos [82].
Questões Culturais e Falta de Conscientização	
Baixa Conscientização Ambiental	Resistência à Mudança de Hábitos
A população brasileira carece de conhecimento sobre a importância da reciclagem. Com isso têm-se a redução da eficácia da coleta seletiva [83].	Pensamentos e comportamentos contrários às atitudes ambientais são um desafio, especialmente em regiões onde a cultura do descarte correto é pouco difundida [84].
Limitações Regulatórias e de Políticas Públicas	
Ausência de Incentivos Governamentais	Regulamentações Inadequadas
Apesar do Brasil ter a Lei de Incentivo à Reciclagem, ela é pouco conhecida por empresários e pela população [85].	A legislação ambiental em sua totalidade apresenta lacunas no que diz respeito ao descarte e ao processamento adequado de resíduos [86].

Desafios Sociais e Informalidade do Setor	
Condições de Trabalho dos Catadores	Formalização e Inclusão
O trabalho da reciclagem realizado no Brasil é desempenhado em sua grande parte por catadores de materiais recicláveis, onde estes muitas vezes são expostos a condições de trabalho insalubres e com baixa remuneração [87].	A ausência de políticas trabalhistas para a formalização do trabalho dos catadores de materiais recicláveis dificulta a integração destes ao sistema de reciclagem, o que limita a capacidade do setor em crescer e tornar-se cada vez mais eficiente [88].

4.2 AUTOMAÇÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS: REDUÇÃO E REAPROVEITAMENTO

A automação tem se apresentado como uma solução inovadora e indispensável quando se trata da modernização da gestão de resíduos, demonstrando em si um avanço significativo no enfrentamento dos desafios ambientais presentes. Este processo de automatização envolve a aplicação de diversas tecnologias como a robótica, a inteligência artificial (IA), os sensores avançados e os sistemas de análise de dados, que quando implantados transformam a forma como os resíduos sólidos urbanos (RSU) são trabalhados, fornecendo a estes tratamentos de triagem, processamento e reaproveitamento. Tais procedimentos devem ser utilizados por meio de investimentos na educação e tecnologia, onde por meio do estudo científico da sustentabilidade ambiental unido a inserção da inovação através incentivos governamentais e políticas público privadas, assim, é possível obter resultados promissores, pois a automação na gestão de resíduos traz consequências importantes, como mostra o Quadro 8.

Quadro 8. Automação na Gestão de Resíduos. (Autoria Própria)

Aspectos	Contribuições
Triagem de Resíduos	A triagem de resíduos no Brasil ainda é majoritariamente manual, um processo lento, caro e arriscado. A automação, com esteiras, sensores ópticos e robôs com IA, melhora a eficiência [89]. Sensores identificam materiais por cor e composição, robôs otimizam a separação e a classificação por densidade distingue materiais leves e pesados [90].
Monitoramento e Análise de Dados	A automação inclui monitoramento em tempo real, que usa sensores e aprendizado de máquina para analisar resíduos [91]. Isso permite prever volumes, otimizar rotas de coleta e identificar tendências.
Solução Para os Desafios Brasileiros	A gestão de resíduos no Brasil enfrenta desafios como lixões e infraestrutura precária [92]. A automação ajuda a superá-los ao aumentar a reciclagem, reduzir descartes inadequados, gerar empregos tecnológicos e impulsionar iniciativas locais em aterros e usinas de compostagem.
Implementação da Automação	Apesar dos benefícios, a automação enfrenta desafios no Brasil, como custos altos e resistência cultural. No entanto, os retornos financeiros e ambientais compensam a longo prazo [93]. O futuro aponta para a integração com políticas públicas, parcerias para modernização e tecnologias acessíveis [94].
Contribuição Para a Sustentabilidade Ambiental	A automação na gestão de resíduos melhora a eficiência e impulsiona a sustentabilidade, reduzindo emissões, preservando recursos e fortalecendo a economia circular [95]. Sua integração transforma resíduos em valor econômico e ambiental, destacando o Brasil no combate à crise global [96].

Mediante os fatos abordados, conclui-se que no Brasil, a reciclagem continua sendo uma das principais soluções para reduzir o impacto ambiental causado pela geração de resíduos sólidos, afinal, como apresentado em todo este artigo científico, a reutilização de materiais descartados auxilia na diminuição de resíduos espalhados pelo território nacional em locais como lixões, aterros sanitários e locais de inapropriado descarte, fazendo com que haja a diminuição de gases causadores de efeito estufa devido a queima destes componentes e dos resultados de uma poluição localizada. Entretanto, a taxa de reciclagem no país ainda é baixa, em parte devido à falta de conscientização pública, infraestrutura insuficiente e investimentos limitados em tecnologia [97]. A análise comparativa reforça que a automação e a tecnologia desempenham papéis cruciais na potencialização dos benefícios ambientais, econômicos e sociais associados à reciclagem, pois elas melhoram o processo presente trazendo rapidez e eficiência na transformação dos materiais para uma nova utilização.

Adicionalmente, os dados analisados indicam que a implementação de tecnologias avançadas, como sensores para monitoramento de resíduos e robôs para triagem automatizada, como também a adoção de sistemas de inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT) etc., podem aumentar a eficiência de todo o ciclo de reciclagem, pois como comprovado, têm-se um upgrade dos processos responsáveis pela reutilização dos materiais com melhor triagem, manuseio e resultado.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo científico teve como objetivo principal explorar a transformação da indústria de reciclagem por meio da automação, destacando suas implicações na sustentabilidade ambiental e na eficiência dos processos. A análise realizada ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) demonstrou que, diante do crescente volume de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil e em outras localidades do planeta, a adoção de tecnologias avançadas baseadas em sistemas sofisticados emerge como uma solução viável e necessária para mitigar os impactos ambientais e fomentar a economia circular.

Inicialmente, foi abordada a produção de lixo no Brasil, trazendo uma análise regional e per capita da situação nacional com relação a produção de materiais descartados pela população, evidenciando um cenário alarmante tanto em termos mais específicos, detidos nas pessoas do país, quanto no que se refere às disparidades regionais (ver item 2.1). Essa análise permitiu compreender não somente os desafios impostos pela heterogeneidade da geração de resíduos, como também a dificuldade de implementação de soluções homogêneas. Adicionalmente, os impactos ambientais das ações humanas a médio e longo prazo, causados pela má gestão desses resíduos, foram também discutidos.

Ao analisar a situação atual da produção de lixo causada pela população brasileira, verifica-se que a cada ano tem-se um aumento e traz consigo impactos ambientais de grande proporção ao nosso país, tanto numa perspectiva geral quanto per capita, vê-se a necessidade de se tomar medidas de amenização desta produtividade maléfica, para que haja mais sustentabilidade e desenvolvimento fabril, tecnológico etc. Além disso, quando se examina as consequências a médio e longo prazo das ações humanas na natureza, percebe-se a dificuldade de realização de ações concretas e que tragam em si, o resultado esperado para o progresso sustentável. Os impactos ambientais por se dividirem em diversas categorias - onde estas fornecem as áreas de afeto, seja em caráter atmosférico, terrestre, hídrico, entre outros, levando-se em consideração a natureza das atividades e dos elementos que foram afetados - nos fornecem um panorama do efeito da ação contra o meio ambiente, trazendo a repercussão de suas atitudes na ausência de recursos naturais, perda de biodiversidade e alterações geológicas e climáticas, com este conjunto de acontecimentos exigindo um método sustentável de amenização situacional brasileira. Com base nisso, este estudo ratifica que para se evitar consequências negativas naturais, têm-se a reciclagem como método sustentável capaz de amenizar a criação de lixo em aterros e de reaproveitar os resíduos que estão aptos a transformação, fornecendo novos produtos e diminuindo as más emissões de gases e o acúmulo de material no planeta. Percebe-se ainda que a reciclagem contribui significativamente com o meio ambiente, pois a problemática trazida aponta o grande acúmulo de lixo pela população brasileira, revelando que em meio as cidades existem também os detritos. Assim, é importante elencar a contribuição fornecida pela reutilização de material descartado, mostrando a maneira utilizada, tipologia etc.

Nesse contexto, a partir desta pesquisa, foi possível verificar que a aplicação de tecnologias automatizadas, como sensores inteligentes, robôs de triagem e sistemas baseados em inteligência artificial (IA), não apenas potencializa os índices de reciclagem, por meio da aceleração de processos, mas também promove impactos positivos na sustentabilidade ambiental. Ao aplicar uma redução na dependência de processos manuais e trabalhar na aprimoração da eficiência na separação de resíduos, a automação contribui diretamente para a diminuição do desperdício, além de ampliar a reutilização de materiais e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Outro ponto a se destacar, é o estudo e comparação com o modelo da República de Singapura, que combina inovação tecnológica com políticas públicas eficazes para estabelecer um ecossistema de sustentabilidade integrado. A análise desse exemplo evidenciou como a junção de sistemas que trabalham com tecnologia, governança e conscientização social é essencial para alcançar resultados consistentes e replicáveis em diferentes contextos.

Por fim, a pesquisa demonstrou que a automação não é apenas capaz de transformar a indústria de reciclagem, mas também traz consigo a mudança estrutural com resultados benéficos em todas as esferas e desempenha um papel crucial na consolidação de um modelo de desenvolvimento sustentável. Ao mesmo tempo em que possibilita a otimização de processos produtivos, a automação representa uma oportunidade para o Brasil reduzir a pressão causada sobre a extração dos recursos naturais, e assim contribuir para a redução de emissões de CO₂ e incentivar a geração de empregos qualificados no setor de tecnologia ambiental.

Dessa forma, pode-se concluir que a integração da automação na gestão de resíduos representa um caminho promissor e indispensável para a construção de um futuro mais sustentável. Embora desafios ainda estejam presentes, como os altos custos iniciais de implementação e a necessidade de capacitação técnica para o trabalho, os benefícios a longo prazo que foram trazidos demonstram que essa transição é não apenas necessária, mas também altamente vantajosa para a sociedade e o meio ambiente. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), ao

consolidar uma visão crítica e embasada sobre o tema, espera contribuir para o debate acadêmico e para a formulação de políticas públicas que fomentem a inovação tecnológica em prol da sustentabilidade ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GAMBIRAZI, Larissa. Qual é a relação da reciclagem com a redução das emissões de gás carbônico na atmosfera? TNAPlast, 2020. Disponível em: <<https://tnaplast.com.br/qual-e-a-relacao-da-reciclagem-com-a-reducao-das-emissoes-de-gas-carbonico/>>. Acesso em: 3 dez. 2023.
- [2] QUADROS, Daniel. O que é gestão de resíduos e qual a sua importância? Meu Resíduo, 2019. Disponível em: <<https://www.meuresiduo.com/outros/o-que-e-gestao-de-residuos-e-qual-a-sua-importancia/#:~:text=O%20gerenciamento%20de%20res%C3%ADuos%20permite,impactos%20negativos%20no%20meio%20ambiente/>>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- [3] Avisos e Alertas. Defesa Civil do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://defesacivil.rs.gov.br/avisos-e-alertas?ordem=RECENTES>>. Acesso em: 12 mai. 2024.
- [4] MAGNI, Jenifer. Gestão de Processos e Gestão de Riscos para Enfrentar Enchentes no Estado do Rio Grande do Sul: Uma pesquisa de caráter bibliográfico. 2023. 25 f. Artigo de Conclusão de Curso (Bacharel em Administração). Curso de Administração. Universidade de Passo Fundo, Carazinho-RS, 2023.
- [5] Cudjoe, D., Wang, H., & Zhu, B. (2021). Assessment of the potential energy and environmental benefits of solid waste recycling in China. *Journal of Environmental Management*, 295, 113072. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113072>>. Acesso em: 12 mai. 2024.
- [6] Ahirwar, R., & Tripathi, A. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100409. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100409>>. Acesso em: 12 mai. 2024.
- [7] Fan, Y. et al. (2021). Forecasting plastic waste generation and interventions for environmental hazard mitigation. *Journal of Hazardous Materials*, 424 Pt A, 127330. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127330>>. Acesso em: 12 mai. 2024.
- [8] Censo 2022 indica que o Brasil totaliza 203 milhões de habitantes. Serviços e Informações do Brasil. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2023/06/centro-2022-indica-que-o-brasil-totaliza-203-milhoes-de-habitantes>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [9] BRASIL IMPORTA LIXO, MAS LUTA PARA RECICLAR SEUS RESÍDUOS. ENTENDA – ABREMA. Abrema.org.br. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2024/06/24/brasil-importa-lixo-mas-luta-para-reciclar-seus-residuos-entenda/>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [10] SZIGETHY, Leonardo. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. Ipea.gov.br. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [11] ABREMA. Lançamento do Panorama dos Resíduos Sólidos 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cMWhpjion9E>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [12] Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. Wwf.org.br. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [13] Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). (2024). Como evolui o cenário de RSU no Brasil. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2024/03/04/como-evolui-o-cenario-de-rsu-no-brasil/>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [14] Administrador CGTI. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos.html>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [15] ISO (Organização Internacional para Normalização). Environmental management systems - Requirements with guidance for use. ISO 14001:2015. Geneva: ISO, 2015. p. 2.
- [16] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre definição de impacto ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Seção 1, p. 1.
- [17] AGUIAR, André Cardim de; SILVA, Kardelan Arteiro da; EL-DEIR, Soraya Giovanetti. Resíduos sólidos: Impactos ambientais e inovações tecnológicas. 1. ed. Recife: Grupo Gestão Ambiental de Pernambuco – Gampe/UFRPE, 2019. p. 300.
- [18] GALVANI, A. et al. Human–environment interactions in population and ecosystem health. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, p. 14502-14506, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1618138113>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [19] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Poluentes Atmosféricos. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [20] CETESB. Fundamentos do controle de poluição das águas. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2018/07/Apostila-Fundamentos-do-Controle-de-Poluicao-das-Aguas.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

- [21] CIMI. Exploração ilegal de madeira ameaça vida e cultura dos indígenas da região. Disponível em: <<https://cimi.org.br/2023/08/exploracao-ilegal-de-madeira-ameaca-vida-e-cultura-dos-indigenas-da-regiao/>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [22] EMBRAPA. Introdução de espécies: uma das maiores causas de perda de biodiversidade. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/811285/1/ADM075.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [23] FUNASA. Textos de Epidemiologia para Vigilância Ambiental em Saúde. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/funasa/textos_vig_ambiental.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [24] UNICEF Brasil. Os desastres brasileiros e suas relações com as mudanças climáticas. Disponível em: <<https://www.unicef.org/brazil/blog/os-desastres-brasileiros-e-suas-relacoes-com-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [25] Mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde humana, afirma OMS. Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/151400-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas-s%C3%A3o-maior-amea%C3%A7a-%C3%A0-sa%C3%BAde-humana-afirma-oms>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [26] NAÇÕES UNIDAS. Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. Disponível em: <<https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [27] ITR. Biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Disponível em: <<https://itr.ufrrj.br/determinacaoverde/biodiversidade-e-servicos-ecossistemicos/>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [28] AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. Efeitos da poluição do ar. Disponível em: <<https://apambiente.pt/ar-e-ruído/efeitos-da-poluição-do-ar>>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [29] GOV.BR. Quais são as consequências da superexploração dos recursos naturais. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/revitalizacao-de-bacias/copy_of_quais-sao-as-consequencias-da-superexploracao-dos-recursos-naturais>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [30] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi, 2021. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- [31] AWOGBEMI, O.; KALLON, D.; BELLO, K. Resource recycling with the aim of achieving zero-waste manufacturing. Sustainability, [s.l.], 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14084503>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [32] WWF. O que é reciclagem? Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?14001%2F>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [33] SHAN, C.; PANDYASWARGO, A.; ONODA, H. Environmental Impact of Plastic Recycling in Terms of Energy Consumption: A Comparison of Japan's Mechanical and Chemical Recycling Technologies. Energies, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en16052199>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [34] GABISA, E.; RATANATAMSKUL, C.; GHEEWALA, S. Recycling of Plastics as a Strategy to Reduce Life Cycle GHG Emission, Microplastics and Resource Depletion. Sustainability, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su15111529>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [35] DE, Brasileiro. Desemprego. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/desemprego.php>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [36] LIZÁRRAGA-MENDIOLA, L.; LÓPEZ-LÉON, L.; VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, G. Municipal Solid Waste as a Substitute for Virgin Materials in the Construction Industry: A Review. Sustainability, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su142416343>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- [37] SAVINI, F. The circular economy of waste: recovery, incineration and urban reuse. Journal of Environmental Planning and Management, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1857226>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- [38] HONMA, S.; HU, J. Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan. Journal of Cleaner Production, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125274>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- [39] GONÇALVES, H. et al. Overcoming Barriers to Sustainable Supply Chain Management in Small and Medium-Sized Enterprises: A Multi-Criteria Decision-Making Approach. Sustainability, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su16020506>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- [40] L14260. Planalto.gov.br. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14260.htm>. Acesso em: 1 set. 2024.
- [41] SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039>>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- [42] CRESWELL, J. W. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014.
- [43] GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [44] VERGARA, S. C. Métodos de pesquisa em administração. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2015.
- [45] LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- [46] SEVERINO, A. J. Metodologia do trabalho científico. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2017.

- [47] CARVALHO, H.; LOPES, J.; CARVALHO, J. National Solid Waste Policy (NSWP): Challenges and Advances after 10 Years of Implementation. *National Journal of City Management*, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.17271/23188472128520243910>>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020/2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br>>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- [49] NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY (NEA). Singapore waste statistics and overall recycling. Singapore: NEA, 2022. Disponível em: <<https://www.nea.gov.sg>>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- [50] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- [51] NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY (NEA). Solid waste management infrastructure in Singapore. Singapore: NEA, 2022. Disponível em: <<https://www.nea.gov.sg>>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- [52] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Lixão Zero: erradicação dos lixões e avanços na gestão de resíduos sólidos no Brasil. Brasília: MMA, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma>>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- [53] NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY (NEA). Towards a zero waste nation: Singapore's waste management strategies and targets. Singapore: NEA, 2022. Disponível em: <<https://www.nea.gov.sg>>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- [54] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Inovação tecnológica na gestão de resíduos sólidos: desafios e oportunidades. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti>>. Acesso em: 8 dez. 2024.
- [55] NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY (NEA). Singapore's waste management and recycling: integrating technology for a sustainable future. Singapore: NEA, 2022. Disponível em: <<https://www.nea.gov.sg>>. Acesso em: 8 dez. 2024.
- [56] UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS (UFAL). Gerenciamento dos custos da coleta de resíduos sólidos: estudo de caso em uma empresa privada transportadora de resíduos sólidos não perigosos. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/9397/1/Gerenciamento%20dos%20custos%20da%20coleta%20de%20res%C3%ADduos%20s%C3%B3lidos%20%3A%20estudo%20de%20caso%20em%20uma%20em%20presa%20privada%20transportadora%20de%20res%C3%ADduos%20s%C3%B3lidos%20n%C3%A3o%20perigosos.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- [57] KOSKINOPOULOU, M. et al. Robotic Waste Sorting Technology: Toward a Vision-Based Categorization System for the Industrial Robotic Separation of Recyclable Waste. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 28, p. 50-60, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MRA.2021.3066040>>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- [58] ULTRALYTICS. Recycling efficiency: the power of vision AI in automated sorting. Disponível em: <<https://www.ultralytics.com/pt/blog/recycling-efficiency-the-power-of-vision-ai-in-automated-sorting>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [59] JOAGRO. As Principais Dificuldades na Reciclagem dos Plásticos. Disponível em: <<https://www.joagro.com.br/blog/post/principais-dificuldades-na-reciclagem-dos-plasticos>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [60] BI, X. et al. Artificial Intelligence for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Small Methods*, v. 8, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/smt.202301243>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [61] STEINERT GLOBAL. As tecnologias de separação baseadas em IA da STEINERT criam novos ciclos na RE Plano. Disponível em: <<https://steinertglobal.com.br/empresa/novidades/news-detail/as-tecnologias-de-separacao-baseadas-em-ia-da-steinert-criam-novos-ciclos-na-re-plano>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [62] ALZAMORA, B. et al. Forecasting and the influence of socioeconomic factors on municipal solid waste generation: A literature review. *Environmental Development*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100734>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [63] INATEL. Sistema de gerenciamento de resíduos usando IoT pretende solucionar problemas causados pelo acúmulo de lixo nas vias públicas. Disponível em: <<https://inatel.br/noticias/sistema-de-gerenciamento-de-residuos-usando-iot-pretende-solucionar-problemas-causados-pelo-acumulo-de-lixo-nas-vias-publicas>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [64] UBIDOTS. IoT e cidades inteligentes: principais aplicações e desafios. Disponível em: <<https://pt.ubidots.com/blog/iot-smart-cities/>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [65] EPE. Inventário energético de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [66] DIO. Transformando a reciclagem com inteligência artificial: o futuro da gestão de resíduos. Disponível em: <<https://www.dio.me/articles/transformando-a-reciclagem-com-inteligencia-artificial-o-futuro-da-gestao-de-residuos?utm>>. Acesso em: 12 jan. 2025.

- [67] Ambipar. Por dentro da maior planta de mineração urbana da América Latina. Disponível em: <<https://ambipar.com/noticias/por-dentro-da-maior-planta-de-mineracao-urbana-da-america-latina/>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [68] NABAVI-PELESARAEI, A. et al. Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.033>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [69] CARABIN, G. et al. A Review on Energy-Saving Optimization Methods for Robotic and Automatic Systems. *Robotics*, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/robotics6040039>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [70] WOOLLEY, E. et al. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.SETA.2018.07.001>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [71] GHIANI, G. et al. Optimizing a waste collection system with solid waste transfer stations. *Computers & Industrial Engineering*, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.CIE.2021.107618>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [72] ANDERSSON, H. et al. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.009>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [73] REBEHY, P. et al. Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. *Journal of Environmental Management*, [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.124>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [74] CONKE, L. Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.03.007>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [75] ZAWIESKA, J. et al. In Search of the Innovative Digital Solutions Enhancing Social Pro-Environmental Engagement. *Energies*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15145191>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [76] LIDIA, A. et al. How to Encourage Recycling Behaviour? The Case of WasteApp: A Gamified Mobile Application. *Sustainability*, [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/SU10051544>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- [77] IBÁÑEZ-FORÉS, V. et al. Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.12.027>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [78] CHEN, Y. et al. Optimizing locations of waste transfer stations in rural areas. *PLoS ONE*, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250962>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [79] ABDEL-SHAIFY, H.; MANSOUR, M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2018.07.003>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [80] GUERRERO, L.; MAAS, G.; HOGLAND, W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [81] WANG, Z.; HUO, J.; DUAN, Y. The impact of government incentives and penalties on willingness to recycle plastic waste: An evolutionary game theory perspective. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11783-019-1208-2>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [82] ZHANG, L.; XU, Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.004>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [83] CONKE, L. Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.03.007>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [84] ALQAHTANI, A.; MAKKI, A. Barriers to the Sustainable Implementation of Environmentally Conscious Manufacturing: A Contextual-Based Interpretive Structural Model. *Sustainability*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su141610066>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [85] STUCHI, J. et al. Analysis of Brazilian public policies which aim to support participatory construction of the National Plan for Soil and Water Sustainable Management. *Land Degradation & Development*, v. 32, p. 3443-3456, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ldr.3860>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [86] BARCHIESI, M.; COSTA, R.; DI PILLO, F. The Link between the Compliance with Environmental Legislation on Separate Collection and the Municipal Solid Waste Costs. *Sustainability*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14095661>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [87] ZOLNIKOV, T. et al. Ineffective waste site closures in Brazil: A systematic review on continuing health conditions and occupational hazards of waste collectors. *Waste Management*, v. 80, p. 26-39, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.047>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

- [88] VALADÃO, M.; DA SILVA, R. National Solid Waste Policy: Analyzing the Collective and Diffuse Rights of Recyclable Materials Collectors. *Ambiente & Sociedade*, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0111vu27l2oa>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [89] KOSKINOPOULOU, M. et al. Robotic Waste Sorting Technology: Toward a Vision-Based Categorization System for the Industrial Robotic Separation of Recyclable Waste. *IEEE Robotics & Automation*, v. 28, p. 50-60, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MRA.2021.3066040>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [90] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Advances in waste sorting and recycling technologies. Disponível em: <<https://www.unep.org>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [91] RAHMAN, M. et al. Intelligent waste management system using deep learning with IoT. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, v. 34, p. 2072-2087, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.08.016>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [92] DEVENDRAN, A. et al. Optimization of Municipal Waste Streams in Achieving Urban Circularity in the City of Curitiba, Brazil. *Sustainability*, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su15043252>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [93] AGUIAR, G. et al. Sustainable Implementation Success Factors of AGVs in the Brazilian Industry Supply Chain Management. *Procedia Manufacturing*, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.284>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [94] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Indústria 4.0 e sustentabilidade: perspectivas para o setor de resíduos. Disponível em: <<https://www.abdi.com.br>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [95] MODI, Shabina et al. AUTOMATIONG WASTE SEGREGATION USING IOT. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.55041/ijrsrem35121>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [96] Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). Waste management policies and automation in emerging economies. Disponível em: <<https://www.oecd.org>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- [97] ALMEIDA, Ronei de; et al. Lessons and challenges for the recycling sector of Brazil from the pandemic outbreak of COVID-19. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, v. 3, p. 145-154, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42768-021-00075-y>>. Acesso em: 17 fev. 2025.