

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Julia Aparecida Almeida Sanseverino

Alternativas para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: Análise técnica preliminar para o município de Juiz de Fora-MG.

Juiz de Fora
2024

Julia Aparecida Almeida Sanseverino

Alternativas para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: Análise técnica preliminar para o município de Juiz de Fora-MG.

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao colegiado do curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária
da Universidade Federal de Juiz de
Fora, como requisito parcial à obtenção
do título de Engenheira ambiental e sanitária

Orientador: Prof. Dr. Samuel Rodrigues Castro

Juiz de Fora
2024

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho reflete a soma de muitas mãos, corações e mentes. Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais “Julin e Eida” que com leveza e muito amor, souberam me direcionar pelo caminho dos estudos e da dedicação, sempre buscando a melhor maneira de realizar meus sonhos e dos que me rodeiam. Aos anjos da guarda, Wanderley e Ilma que me receberam em Juiz de Fora como filha para que eu pudesse iniciar a minha trajetória profissional.

À professora Renata Gonçalves, que como profissional de educação soube facilitar caminhos aos seus alunos de apenas 13 anos, e me deu a oportunidade de estudar as profissões e fazer uma escolha de vida, não apenas pelo curso que me dediquei, mas pela maneira de pensar ao decidir.

Às “meninas da Engenharia”, que, entre risadas e desabafos, e até algumas crises de insensatez, me lembraram da importância de respirar e me apresentaram o significado de amizade. À “Thay Fae”, prima, irmã, confidente e por vezes, mãe, que dividiu as primeiras frustrações da vida adulta e ainda foi minha melhor companhia nesses anos. Ao “meu bem” pela paciência infinita e por acreditar no meu potencial, mesmo nas noites mais longas sendo parte fundamental da persistência com o encerramento do curso.

À minha pessoa favorita, Livia, que me lembra todos os dias o motivo de ser exemplo e dedicação ao meu valor de família e que sabe, como ninguém, a me fazer voltar para o eixo.

Por fim, deixo minha gratidão ao meu orientador, Samuel, que soube transformar uma ideia em caminho viável, promovendo um encerramento digno dessa trajetória universitária. Neste momento, estendo à todo o corpo docente pela dedicação em inspirar cada passo da formação de centenas de alunos.

RESUMO

O presente trabalho abordou a avaliação do impacto ambiental, socioeconômico e na infraestrutura municipal relacionado a alternativas para resíduos sólidos urbanos (RSU). A pesquisa concentra-se na análise crítica de diferentes alternativas para o gerenciamento de resíduos, considerando aspectos e desafios enfrentados pelo município de Juiz de Fora. Com o objetivo de avaliar os impactos diferentes da implementação de tecnologias diversificadas e respeitando uma ordem de prioridade entre elas. Para tal, uma revisão bibliográfica abrangente foi realizada sobre as principais alternativas para o tratamento de RSU, incluindo aterros sanitários, incineração, reciclagem e compostagem. Em seguida, são avaliados três cenários diante do seu balanço de massa e fluxo de resíduos por meio da ferramenta de Rotas e Custos. Os cenários foram definidos por apresentar modelos de tratamentos divergentes, além de serem validados de acordo com metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) nos diferentes anos de atribuições. Os resultados obtidos foram discutidos em termos de sustentabilidade, destacando limitações da própria ferramenta e direcionando para novas possibilidades de gestão integrada para o município. No desfecho, o trabalho de conclusão de curso conclui com impactos positivos da diversificação de tratamentos para os resíduos sólidos que antecedem a disposição final. Por exemplo, houve uma redução de volume no aterro sanitário, que passou a ser 10 vezes menor que os valores atuais em m³/dia. Além do alcance das metas do PLANARES no que tange os percentuais de recuperação dos resíduos não destinados para aterros, chegando a ter uma recuperação na faixa de 74%.

Palavras-Chave: Gestão integrada de resíduos sólidos. Rotas tecnológicas. Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custo de Manejo.

ABSTRACT

The present study evaluated the environmental, socioeconomic, and municipal impacts of alternatives for managing urban solid waste (USW). The research focused on a critical analysis of different alternatives for waste management, considering the specific challenges faced by the city of Juiz de Fora. The aim was to assess the impacts of implementing diverse technologies in a prioritized order. An extensive literature review was conducted on the main USW treatment alternatives, including landfills, incineration, recycling, and composting. Three scenarios were then analyzed based on mass balance and waste flow using the Routes and Costs Tool. These scenarios were defined by presenting different treatment models and validated according to goals set by the National Solid Waste Plan (PLANARES) for various target years. The results were discussed in terms of sustainability, highlighting limitations of the tool and suggesting new possibilities for integrated management in the municipality. The study concludes with positive impacts from diversifying solid waste treatments prior to final disposal. For example, the volume at the landfill decreased by tenfold compared to current values in m³/day. Beyond meeting the PLANARES targets regarding the percentage of waste recovery not directed to landfills, achieving a recovery rate of around 74%.

Keywords: Integrated solid waste management, Technological routes, Routes and Costs Tool.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Objetivos.....	9
1.1.2 Objetivos específicos.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	11
2.2 Aspectos Legais para RSU.....	13
2.3 Rotas tecnológicas.....	14
2.4 Tecnologias Alternativas.....	19
2.4.1 Estado da arte no Brasil.....	21
2.4.2 Inclusão do tratamento térmico na políticas atuais.....	22
2.4.2.1 Métricas e objetivos legais para tratamentos térmicos.....	23
2.4.3 Entraves para o Licenciamento.....	24
2.4.4 Desafios e Vantagens.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Caracterização do município.....	29
3.1.1 Aspectos Socioeconômicos.....	30
3.1.2 Histórico de RSU na cidade.....	30
3.1.3 Gestão e gerenciamento de RSU.....	32
3.2 Ferramentas de Rotas e Custo.....	32
3.3 Cenários de aplicação.....	35
3.4 Condições de contorno para a ferramenta.....	36
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma das principais preocupações enfrentadas pelas cidades no contexto atual, devido à sua relevância para a saúde pública, ao meio ambiente, ao desenvolvimento sustentável e aos gastos públicos. É crucial repensar e aprimorar continuamente as estratégias de tratamento e destinação final dos RSU para garantir eficiência e mitigar os impactos negativos associados.

Atualmente, grande parte dos resíduos sólidos no Brasil é disposto em lixões e aterros sanitários. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2024), apenas cerca de 58% dos municípios brasileiros possuem aterros sanitários adequados, enquanto muitos ainda utilizam lixões ou aterros controlados. Esses métodos de disposição inadequada apresentam riscos ambientais significativos, como a contaminação do solo e dos corpos d'água, a emissão de gases de efeito estufa e a proliferação de doenças (BRASIL, 2018).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), previa o encerramento dos lixões até 2014, mas essa meta não foi atingida. O novo Marco Legal do Saneamento Básico (2020) estipulou novos prazos para o encerramento dessas práticas inadequadas, detalhando os prazos de encerramento até 2024, a depender da população do município. No entanto, a confederação nacional de municípios (DUARTE; SCHOENELL, 2024), alerta sobre a dificuldade de implementação dessas políticas, incluindo a falta de infraestrutura, financiamento e apoio técnico. Eventualmente, com os prazos encerrados essas metas seguiram a mesma tendência de não atingimento do encerramento dos lixões e aterros controlados.

Além dos problemas ambientais, o fechamento de lixões apresenta um desafio social significativo. Muitas comunidades dependem economicamente dos resíduos dispostos nesses locais. O Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR) estima que cerca de 800 mil pessoas no Brasil trabalham como catadores informais, ainda em 2023 (BRASIL, 2023). O fechamento de lixões sem a inclusão adequada desses trabalhadores nos programas de gestão de resíduos aumenta a vulnerabilidade social dessas populações e é um dos desafios sugeridos pelo Roteiro para encerramento de Lixões (BRASIL, 2021).

Apesar da importância dos aterros sanitários como alternativa ambientalmente mais adequada, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos na gestão de resíduos sólidos, como indica o próprio Ministério do Meio Ambiente (MMA,2024). Apenas 29% dos brasileiros têm acesso facilitado à coleta seletiva, e pouco mais da metade dos municípios possuem um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, segundo a Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2024).

Diante desse cenário, é urgente buscar alternativas mais eficientes para o tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos. Entre as várias opções tecnológicas, o tratamento térmico se destaca como uma solução promissora. Tecnologias como a incineração, a pirólise, a gaseificação e o plasma de gás oferecem vantagens significativas, incluindo a redução do volume de resíduos, a geração de energia e a eliminação de componentes perigosos (Franco, 2016). Ainda, segundo Franco (2016), essas vantagens facilitam as etapas posteriores como a disposição, justamente pela diminuição do volume, além de recomendar melhorias e incentivos nas adequações das etapas anteriores como reciclagem de materiais, o que atualmente pode ser evidenciado no uso da tecnologia para resíduos industriais e de saúde. Importante ressaltar que a facilidade considerada pelo autor não é cogitada considerando a geração de energia por meio dos tratamentos térmicos (FRANCO, 2016).

Este trabalho está estruturado com uma revisão bibliográfica da literatura, abordando os desafios e tendências na gestão de resíduos sólidos. Foram destacados os principais problemas enfrentados e as soluções propostas em outras localidades com situação semelhante à da cidade de Juiz de Fora. Em seguida, descreveu-se a metodologia empregada na elaboração e desenvolvimento de uma nova proposta para o município, incluindo a coleta de dados, análises de informações e planos de ações pragmáticos. Por fim, foram apresentados os resultados obtidos, acompanhados de uma discussão sobre os potenciais, as consequências e as contribuições para a realidade local, concluindo o estudo com as limitações do trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

Espera-se que este trabalho forneça subsídios relevantes para o aprimoramento das políticas públicas e práticas de gestão de resíduos sólidos urbanos em Juiz de Fora, contribuindo para a construção de uma cidade mais sustentável, saudável e resiliente.

1.1 Objetivos

Este trabalho busca contribuir de forma prática com essa lacuna supracitada, analisando de maneira preliminar a viabilidade técnica para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Juiz de Fora-MG, com foco, ainda mais específico, em tecnologias de recuperação energética.

1.1.2 Objetivos específicos

Foi avaliado, por tanto, três diferentes cenários de rotas tecnológicas, considerando a meta do Planares de 2022, como objetivo claro das propostas para diversidade de tratamentos sugeridos ao gerenciamento de resíduos sólidos.

Com a pretensão de analisar o potencial dos tratamentos térmicos e sua contribuição para toda a hierarquia preconizada, assim como para as metas estabelecidas pelas regulamentações, por meio da ferramenta de Rotas tecnológicas e Custos de Manejo para RSU.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com os últimos dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023), em 2022, foi registrado uma massa de 77,1 milhões de toneladas geradas pelo brasileiro, o que corresponde a 1,04kg diário por pessoa. Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, existe grande variação entre as diferentes regiões brasileiras, mas indiscutivelmente, houve redução de 2% na geração em relação aos últimos dois anos pandêmicos. Considerando esse volume gerado, tem-se uma cobertura de coleta para 2022 na casa dos 93%, um valor aparentemente positivo para uma coleta adequada. No entanto, esses 7% não coletados, representam uma base de 5 milhões de toneladas sem tratamento ou destinação adequada (ABREMA,2023). Quando se discute o número para além do valor quantitativo e entendemos o que ele representa, podemos comparar, com praticamente a mesma massa gerada em milhões de toneladas por todo o país da Croácia no ano de 2020 (Eurostat, 2024).

Esse último panorama, se refere de forma mais específica para a geração dos resíduos. Ao avançar para as próximas etapas da hierarquia preconizada, outros indicadores chamam a atenção. Relatórios do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2018) apontam que a educação ambiental nas escolas e nas comunidades ainda é insuficiente para criar uma cultura de sustentabilidade e responsabilidade com os resíduos sólidos. Uma pesquisa realizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2021) revelou que apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos são encaminhados para reciclagem. Isso reflete uma falta de conscientização sobre a importância da gestão adequada dos resíduos sólidos e a hierarquia preconizada.

Os RSU são uma problemática multidisciplinar e abrange questões ambientais, sociais, econômicas e de saúde pública. A gestão dos RSU no Brasil é um desafio complexo que tem exigido atenção crescente de autoridades, pesquisadores e da sociedade em geral. A própria legislação que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define essa complexidade e diversidade ao apresentar seus princípios, em seu art 4º apresentado a seguir, é possível conferir tais definições.

III - a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública;

IV - o desenvolvimento sustentável;

VI - a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade;

VII - a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;

VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;

A PNRS também estabelece uma hierarquia de prioridade entre as etapas de gestão dos resíduos sólidos, de forma a balizar o modelo estratégico para a tratativa. Entretanto, segundo Oliveira (2019), esta abordagem não considera fatores políticos, sociais ou tecnológicos de cada município. Posteriormente, em 2023, essa hierarquia foi atualizada pela NBR 17.100-1 (ABNT, 2023), de forma mais específica ao incluir a recuperação energética e a eliminação como etapas que antecedem a disposição ambientalmente adequada.

Ao avaliar os dados brutos fornecidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS), o investimento em abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil é significativamente maior do que em resíduos sólidos (Brasil, 2023b). O que corrobora para os desafios diagnosticados na gestão e gerenciamento. Em 2020, 70% dos recursos destinados ao saneamento foram para abastecimento de água e esgotamento sanitário, enquanto apenas 4% foram alocados para resíduos sólidos (Instituto Trata Brasil, 2020).

2.1 Resíduos sólidos urbanos no Brasil

A PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, é o principal marco regulatório que define a hierarquia de resíduos no Brasil. A lei visa integrar o gerenciamento de resíduos sólidos, promovendo práticas sustentáveis e a inclusão social dos catadores de materiais recicláveis (Brasil, 2010). Segundo Silva *et al.* (2018), a implementação da PNRS trouxe avanços significativos, mas ainda enfrenta desafios devido à falta de infraestrutura adequada e de investimentos.

A aplicação efetiva da hierarquia de resíduos enfrenta diversos obstáculos. Pesquisas apontam que muitos municípios brasileiros ainda não possuem planos de gestão integrada de resíduos

sólidos, conforme exigido pela PNRS (SILVA; BOLL; ZANIN; PERETTI; SOUZA, 2022). A falta de recursos financeiros e técnicos é uma barreira significativa para a implementação dessas políticas. Alguns autores citam que esta insuficiência de recursos, inclusive, é o principal entrave para a efetivação da gestão integrada nos municípios brasileiros, junto com a falta de infraestrutura adequada (SILVA; BOLL; ZANIN; PERETTI; SOUZA, 2022).

Esses fatores revelam que apesar dos avanços trazidos pela legislação, ainda persistem desafios significativos na implementação efetiva das políticas de gestão de resíduos em nível municipal. Com a desigualdade financeira e de recursos latente entre os municípios brasileiros, os avanços na aplicação de uma gestão adequada seguem as mesmas proporções.

A redução na geração de resíduos é o primeiro e mais importante passo na hierarquia de resíduos. Estudos indicam que a não geração está diretamente correlacionada com os hábitos sociais e devem compartilhar responsabilidade com a indústria de produtos que, por vezes, dita hábitos de consumo (IPEA, 2020). A reutilização de materiais, embora menos comum, tem ganhado espaço em práticas como o reaproveitamento de resíduos da construção civil (MIRANDA *et al.*, 2018).

A reciclagem também se apresenta como uma das práticas mais difundidas, mas ainda subaproveitada no Brasil. Como citado anteriormente, o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2021), indica que apenas 13% de todo resíduo urbano coletado é destinado para reciclagem. Como consequência, as demais rotas tecnológicas perdem em nível de cobertura e eficiência, como apontam os dados do SNIS (Brasil, 2023b).

Avançando na hierarquia, destaque-se as diversas abordagens e tecnologias para o tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Estas vão desde a redução e reciclagem até a compostagem, aterros sanitários e a produção de energia a partir dos resíduos. No entanto, a efetividade e viabilidade dessas tecnologias muitas vezes dependem de fatores como infraestrutura, capacitação técnica, disponibilidade de recursos financeiros e conscientização da população (Brasil, 2023b). O tratamento de resíduos, que inclui recuperação energética, é ainda incipiente no Brasil (Fratta *et al.*, 2019). A revisão sistemática, evidencia os estudos e intenções voltados para aproveitamento energético desde 2017, e os avanços são pouco significativos (Fratta *et al.*, 2019).

Considerando a Incineração com uma das tecnologias de aproveitamento energético, temos um desafio claro no Brasil, visto que a maior parte dos RSU são destinados diretamente para a disposição final em aterro sanitário (SILVA *et al.*, 2019). A disposição final adequada, que deveria ser a última etapa, é frequentemente a mais utilizada, com muitos resíduos sendo destinados a aterros sanitários, e, ainda de forma preocupante, a lixões a céu aberto. (ABREMA, 2023).

2.2 Aspectos Legais para RSU

O gerenciamento de resíduos sólidos, exige alguns conceitos que norteiam todos os processos de gerenciamento. Um deles, que se apresenta de forma significativa é a ordem de prioridade estabelecida para o manejo dos RSU.

A hierarquia de resíduos sólidos, estabelecida pela norma (ABNT, 2023), define uma nova sequência de ações prioritárias para a gestão adequada de resíduos. Essa ordem consiste em: não geração, redução, reutilização, reciclagem, recuperação energética, eliminação e, por último, a disposição final ambientalmente adequada. Esse princípio orientador busca minimizar os impactos ambientais dos resíduos sólidos e promover práticas sustentáveis ao longo de todo o ciclo de vida dos materiais.

A **não geração** como primeira etapa vem como modelo de prevenção na mudança de hábitos da sociedade de modo geral. Análogo a essa posição se encontra a etapa de **redução**. Os próprios valores de geração de resíduos em época de pandemia podem registrar como hábitos de consumo promovem impacto no volume destes (ABRELPE, 2022). Por meio do Decreto nº11.414/2023, alguns incentivos referente à logística reversa promovem intenções para a diminuição dos resíduos sólidos no cotidiano, sendo ainda mais específico em seu artigo 3 que estabelece premissas para a não geração de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2023a).

Para a **reutilização** estabelece-se alguns requisitos para embalagens reutilizáveis, bem como sugere a ABNT NBR 16001:2012 (ABNT, 2012), que aponta a relevância da reutilização para um sistema de Gestão de Responsabilidade Social para organizações e civilizações. Para esse pilar, associa-se a utilização do resíduo sem transformação ou processos químicos, com a possibilidade de utilizar novamente o mesmo material para funcionalidades correlatas ou adversas.

Na etapa da **reciclagem**, materiais descartados são transformados em novos produtos, promovendo a diminuição da extração de recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado. A etapa de reciclagem sucede a uma série de demandas, como uma coleta seletiva adequada, e uma eficiente triagem e classificação, além da limpeza. Todos fatores que dependem da conscientização da população em atos voluntários ou dos principais responsáveis por nossa porcentagem de coleta, os catadores. Dados apontam que 64% das unidades de triagem municipais são geridas por associações ou cooperativas de catadores, sendo que 9 em cada 10 kgs de embalagens recicladas chegam à indústria de reciclagem por meio do trabalho dos mesmos (Reciclagem [...], c2024).

E então, entramos na etapa de **recuperação energética**, trazida como uma solução inovadora na gestão de resíduos sólidos com a proposta de transformar o valor calorífico armazenado nas substâncias dos resíduos, além do subproduto de tratamentos biológico e gases de aterro em energia utilizável. Para isso, os fatores que detalham e antecedem a recuperação energética, são na verdade parte do processo. Isso acontece, devido a viabilidade da recuperação energética ser diretamente associada à forma como os processos anteriores foram estabelecidos, a exemplo de uma coleta indiferenciada dos resíduos, ou seja, sem distinção ou segregação dos secos e úmidos, pode dificultar a produção de energia elétrica por meio dos processos de aproveitamento (Fratta *et al.*, 2019).

2.3 Rotas tecnológicas

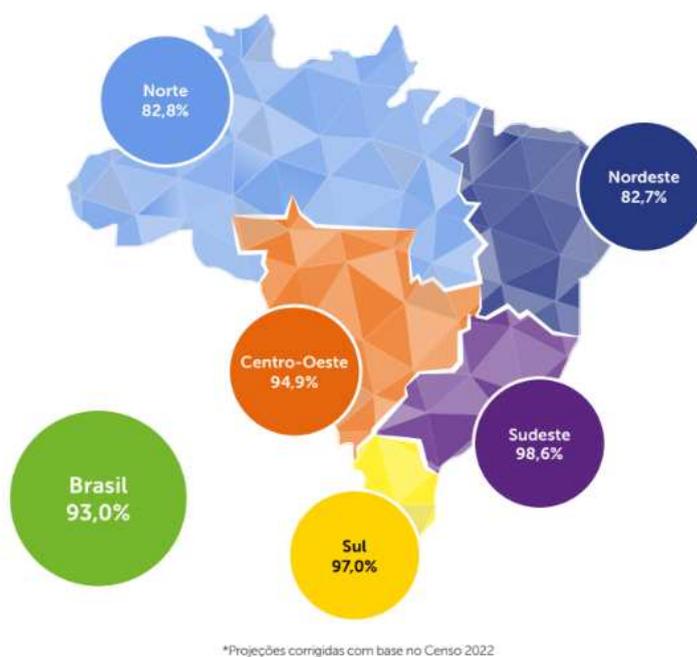
As rotas tecnológicas são um conceito avançado do que é considerado no gerenciamento integrado, em que atrelamos diferentes metodologias de coleta e tratamento para lidar com todos os materiais de forma ambientalmente adequada durante todo o fluxo de geração e descarte (White; Franke; Hindle, 1995). Isso inclui a análise de viabilidade econômica e aceitação social para os tratamentos e operações sugeridas.

O fluxograma integrado de gerenciamento atualmente é uma diretriz da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Os três pilares de um ecossistema sustentável econômico, ambiental e social ditam o ritmo dos avanços tecnológicos, uma vez que essas rotas iniciam na segregação logo na origem dos resíduos.

A primeira etapa do gerenciamento envolve a coleta e o transporte dos resíduos. A cobertura nacional avaliada pelo SINIR (Sistema Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos) em 2019 compreendia 94,63% de cobertura indiferenciada e 41,41% para coleta seletiva, dos municípios declarantes (Brasil, 2019), ocorrendo por veículos específicos de porta em porta, ou em Pontos de Entrega voluntários (PEVs). Em seguida, encaminha-se para a triagem, etapa de segregação dos resíduos, essencial para aperfeiçoar a eficiência das próximas etapas (SILVA *et al.*, 2018).

De acordo com o ABREMA 2023, os valores observados por região apresentam essa desigualdade e a ausência de condições adequadas para coleta, transporte e destinação final de RSU, nas Figuras 1 e 2, é possível avaliar essas diferenças.

Figura 1. Percentual de RSU coletados por macrorregiões brasileiras em 2022.



Fonte: ABREMA, 2023

Figura 2. Disposição final de RSU por região no Brasil em 2022



Fonte: ABREMA, 2023

A partir da triagem alguns processos ganham mais relevância e eficiência, como a reciclagem e compostagem (ABREMA, 2023). Ambos considerados tratamentos para os resíduos, a reciclagem é destinada aos resíduos secos como papel, plástico, vidro, metais e/ou variações desses materiais, enquanto que a compostagem é um processo orgânico destinado aos resíduos de alimentos e restos de podas. Pensando na grandiosidade territorial do Brasil, existe muito potencial nesse processo, principalmente nos perímetros rurais, onde o produto da compostagem tem um destino imediato (SANTOS *et al.*, 2019).

A reciclagem enfrenta um desafio muito claro que é a baixa adesão. A ABRELPE (2022) declara que a reciclagem no Brasil não consegue contemplar toda a população brasileira.

A partir dessas etapas, temos alternativas de tratamento pouco aproveitadas no Brasil atualmente pelo que declara a ABRELPE (2022). A digestão anaeróbia, por exemplo, que usa microrganismos para a decomposição de resíduos e o próprio biogás, que se apresenta com cerca de 936 plantas aplicadas em território nacional (CiBiogás, 2022). Mesmo sendo um valor incipiente para o potencial que a tecnologia apresenta, já se encontra estabelecido para diferentes substratos, mas principalmente pela Agropecuária (CiBiogás, 2022). Alguns autores mostram essa tecnologia como alternativa para o tratamento dos orgânicos e lodo de

esgoto (REVIVA, 2024), com grande potencial para se tornar parte do processo por gerar subprodutos de interesse econômico, com a produção de biogás e biofertilizante.

Outro exemplo de rota pouco aproveitada é a incineração, uma solução eficiente para redução em massa e volume do resíduo. Uma alternativa que requer investimentos em tecnologias de controle ambiental de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (COSTA e MARTINS, 2017). Embora essas tecnologias estejam disponíveis no Brasil, essa ausência das alternativas como tecnologias amplamente disseminadas no gerenciamento de resíduos é justificada pelos custos e a falta de uma maior integração na gestão dos RSU, como apontam Szigethy, Antenor (2021).

Soluções como as comentadas, já são tratamentos de RSU devidamente disseminados em outros países como Suécia (ONU, 2019) e Japão (SOUZA, 2021), enquanto que no Brasil os aterros são a solução mais óbvia nacionalmente falando (Brasil, 2019). Sendo a destinação aos aterros sanitários a etapa que finaliza a sequência de prioridades para o gerenciamento (ABNT NBR 17100-1:2023), compreende-se que todas as outras etapas estão em negligência no território nacional. Os aterros sanitários são amplamente utilizados no Brasil, mas ainda assim muitos funcionam de maneira inadequada (BRAGA *et al.*, 2018).

O fato de haver uma só tecnologia como parte do gerenciamento de tratamento e destinação de resíduos sólidos no Brasil, é um forte indicador de que em termos de gerenciamento integrado ainda estamos muito distantes do considerado adequado (Brasil, 2022a).

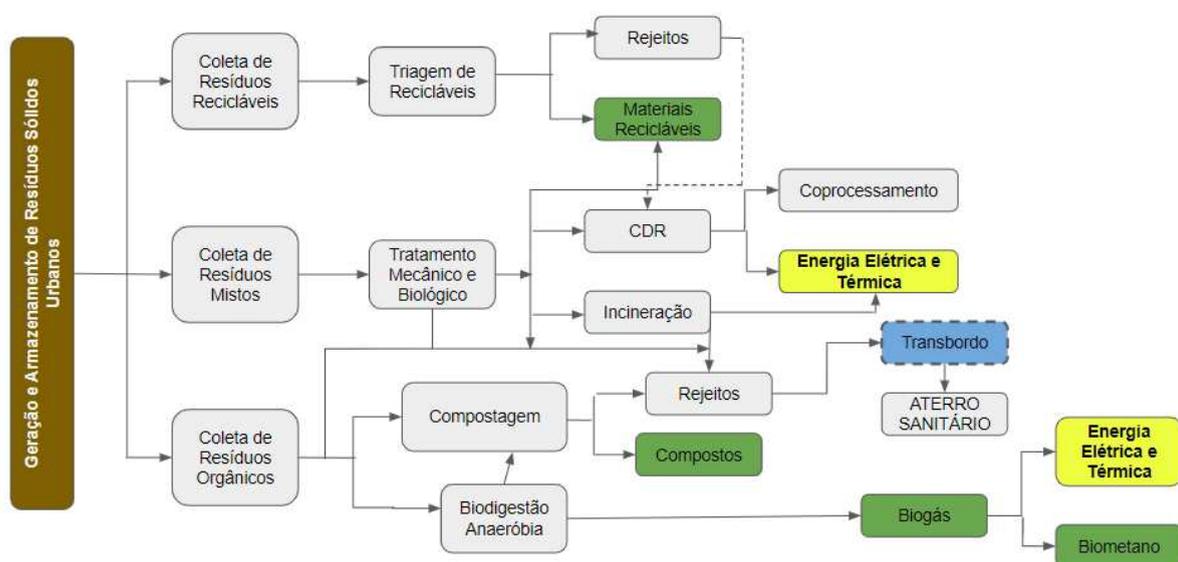
A nível de comparação, a Europa apresentava uma diversidade de tratamentos e tecnologias desde 2016. Em 2020, aproximadamente 47% dos resíduos municipais europeus foram reciclados e/ou compostados, enquanto que 28% foram incinerados (Eurostat, 2020). Diferentemente da elevada taxa de destinação final sem tratamento prévio que confere ao Brasil, a União Europeia destina 24% dos resíduos a aterros sanitários, segundo Eurostat. Este valor, se refere a rejeitos que não puderam ser recuperados anteriormente comprovando o acelerado progresso para diversidade tecnológica no tratamento e destinação de RSU.

Ao considerar tecnologias alternativas, alguns estudos precisam ser feitos. Nenhuma delas vai ser declarada 100% ideal independente da situação. Avaliando fatores como aspectos ambientais, custos, questões sociais e consistência técnica e operacional, é possível enquadrar

uma diversidade de tecnologias para destinação e tratamento dos RSU (DASKALOPOULOS; BADR; PROBERT, 1998).

Partindo desse pressuposto, tem-se portanto a definição de rotas tecnológicas, em que nenhuma tecnologia atuando sozinha seria solução para o manejo de resíduos (REICHERT, 2022). Desde o processo de geração até a destinação final em aterro sanitário, todas as alternativas utilizadas durante o fluxo de resíduos é o que se chama de rota tecnológica. Atualmente, as principais rotas estão definidas no fluxograma apresentado na Figura 3:

Figura 3. Fluxograma de operação com as principais rotas de utilidade.



Fonte: Própria autoria (2024) adaptado de Reichert, G.A (2022).

No fluxograma apresentado pela Figura 1, ampliou-se a operação para três tipos de coletas distintas, além de considerar aproveitamento de orgânicos, podendo ser considerada, inclusive, uma rota complexa (REICHERT, 2022).

O Diagnóstico temático com a visão geral dos resíduos sólidos atualizado pelo SNIS em 2022 corrobora com o entendimento da adesão às diferentes rotas tecnológicas e suas eficiências (BRASIL, 2023b).

Os dados históricos ainda mostram pelo cadastro nacional de unidades de processamento que a maior parte dessas unidades, de modo geral, são operadas pelos próprios municípios (BRASIL, 2019).

2.4 Tecnologias Alternativas

Como supracitado, tem-se de forma incipiente a utilização e implementação de tecnologias que poderiam anteceder a disposição final de resíduos sólidos. No quadro 1, foram evidenciadas algumas tecnologias alternativas alinhadas a esses princípios, comentando suas vantagens e desafios no contexto brasileiro.

Quadro 1. Relação de vantagens e desvantagens de principais tecnologias alternativas para RSU (Continua)

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem	Referências
<p>Compostagem</p> <p>Descrição: A compostagem é o processo biológico de decomposição da matéria orgânica (resíduos de alimentos, restos de poda, etc.) por micro-organismos em condições controladas de temperatura e umidade. O resultado é o composto orgânico, um fertilizante natural.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Redução significativa do volume de resíduos orgânicos destinados a aterros. - Produção de composto orgânico que pode ser utilizado na agricultura, jardinagem e recuperação de solos degradados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de segregação eficiente de resíduos orgânicos. - Infraestrutura e logística para coleta e transporte de resíduos orgânicos. - Educação e conscientização pública sobre a importância da separação de resíduos. 	<p>Haug, R. T. (1993).</p> <p>Epstein, E. (2011).</p> <p>Bernal, M. P., 2009.</p>
<p>Digestão Anaeróbica.</p> <p>Descrição: A digestão anaeróbia é um processo biológico em que micro-organismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás e digestato (biofertilizante).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável. - Redução significativa do volume de resíduos orgânicos destinados a aterros. - Produção de biofertilizante, que pode ser utilizado na agricultura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de segregação e investimentos iniciais elevados para construção de biodigestores. - Infraestrutura e logística para coleta e transporte de resíduos orgânicos. - Tecnologias e estudos\conhecimento ainda em desenvolvimento em muitas regiões do Brasil. 	<p>Sawatdeenarunat, et al., 2015.</p> <p>Franco, 2016</p> <p>Ramos, A. I. M. C., 2020.</p>

Fonte: autoria própria (2024)

Quadro 1. Relação de vantagens e desvantagens de principais tecnologias alternativas para RSU (Continuação)

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem	Referências
<p>Pirólise e Gaseificação</p> <p>Descrição: A pirólise e a gaseificação são processos termoquímicos que transformam resíduos sólidos em gases combustíveis, óleos e carvão vegetal, mediante aquecimento na ausência ou presença controlada de oxigênio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Redução significativa do volume de resíduos. - Produção de energia a partir de resíduos não recicláveis e também gerado pelo calor da queima de gás e óleos. - Menor emissão de poluentes comparado à incineração convencional. - Destruição de patógenos e substâncias perigosas 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo de implementação e operação. - Necessidade de segregação eficiente de resíduos; - Requisitos técnicos e de manutenção elevados. 	<p>Bridgwater, A. V. , 2012.</p> <p>Ramos, A. I. M. C., 2020.</p>
<p>Incineração Convencional</p> <p>Descrição: A incineração é a combustão controlada de resíduos sólidos a altas temperaturas (800-1000°C), resultando na redução de massa e volume dos resíduos, além de geração de energia térmica ou elétrica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Redução significativa do volume de resíduos (até 90%). - Produção de energia a partir do calor gerado pela combustão. - Destruição de patógenos e substâncias perigosas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos custos de implementação e operação. - Necessidade de sistemas avançados de controle de emissões para evitar a liberação de poluentes tóxicos (dioxinas e furanos). - Geração de cinzas e escórias que requerem disposição adequada. 	<p>Williams, P. T. (2013).</p> <p>Astrup, T., Møller, J., & Fruergaard, T. (2009).</p>

Fonte: autoria própria (2024)

Com a análise do quadro 1 é possível identificar que um dos principais desafios observados se encontra no investimento da implementação da tecnologia. A melhora nos incentivos para o setor de resíduos sólidos pode ser apresentada como a solução para mudar o cenário atual, bem como institui a Lei nº14.026 de 15 de julho de 2010, que sugere a cobrança pelos serviços prestados como um incentivo para o setor de saneamento (BRASIL, 2020). Com políticas públicas eficientes de incentivos financeiros e busca por inovação, os desafios de conhecimento e instauração de infraestrutura se tornam consequências.

Outra observação interessante a se analisar é a presença de tratamento térmico em três formatos diferentes no quadro. É válido considerar que os resultados positivos frente às desvantagens, conseguem ser mais relevantes. Segundo Franco (2016), essas desvantagens tendem a diminuir conforme os investimentos estiverem aumentando, inversamente proporcional às vantagens que surgirão por consequência.

O tratamento térmico para resíduos sólidos tem grandes vantagens ao utilizar o calor para diminuir o volume em massa dos resíduos, eliminando componentes perigosos e ainda gerando energia, além de ser possível trabalhar em grande escala com essa modalidade (RAMOS, 2020).

A redução do volume em até 90% (RAMOS, 2020), assim como em outros processos, as altas temperaturas favorecem a destruição de patógenos e outras substâncias químicas perigosas, desde que em ambiente controlado, e esse efeito não é diferente com o tratamento térmico para RSU (RAMOS, 2020). Por fim, ainda segundo Franco (2016) a produção de energia como subproduto pode se apresentar como energia térmica ou mesmo a elétrica com capacidade para contribuir para a matriz energética do país.

2.4.1 Estado da arte no Brasil

No Brasil, o tratamento térmico representa uma fração minoritária de resíduos sólidos. Segundo o SNIS (BRASIL, 2023b), estima-se que apenas 4% dos resíduos sólidos urbanos são recuperados, seja por reciclagem compostagem ou recuperação energética. Algumas são as limitações que podem justificar essa baixa adesão.

Um dos principais desafios é a conscientização, segundo Santos e Costa (2019) a maior parte da resistência à adoção de tratamentos térmicos está no desconhecimento por parte da população e principalmente dos tomadores de decisões.

Santos (2019) ao citar os tomadores de decisões, discute sobre as políticas públicas e regulamentações. Atualmente, as políticas brasileiras não favorecem a implementação. Existe dificuldade na implementação de novos projetos, independentes, pela alta burocracia e falta de incentivos, mas de forma específica para resíduos sólidos, às políticas brasileiras, frequentemente, favorecem a destinação a aterros sanitários, por serem mais simples no curto prazo (SANTOS, 2019).

Além disso, é possível apresentar a falta de infraestrutura e também dos custos elevados. Os avanços tecnológicos em sistemas de controles de gases e também para a gestão de subprodutos na maior parte das regiões do Brasil é insuficiente. Não bastasse as limitações supracitadas, a instalação de tratamentos térmicos sugere significativos investimentos financeiros (SILVA; BOLL; ZANIN; PERETTI; SOUZA, 2022).

Relevante considerar que ao avaliar os desafios, eles estão diretamente associados às consequências de outros desafios. Desta forma, ao trabalhar uma das limitações, outras desvantagens se tornam menos impactantes (SILVA; BOLL; ZANIN; PERETTI; SOUZA, 2022).

2.4.2 Inclusão do tratamento térmico na políticas atuais

A inclusão do tratamento térmico na legislação brasileira ainda é limitada. Embora a PNRS e o novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) incentivem práticas de tratamento ambientalmente adequadas, a implementação prática dessas tecnologias enfrenta desafios significativos. De forma prática, o desafio é divergente às definições estabelecidas pelo PLANARES (BRASIL, 2022a), que estabelece que até 2040 deve-se destinar 14% dos resíduos aos tratamentos térmicos.

A adoção de tecnologias de tratamento térmico requer investimentos iniciais elevados e infraestrutura avançada, além de uma mão de obra especializada para manutenção e operação. Justamente pelo seu alto investimento, precisa ser elaborada em escalas maiores, para se tornar vantajosa (SANTOS *et al.*, 2019). Além da desigualdade de acessos entre os municípios que sugere diferentes desafios para os variados locais brasileiros. Segundo Oliveira (2019), a falta de recursos financeiros é um dos principais obstáculos para a implementação dessas tecnologias nos municípios brasileiros e não coincidentemente, a falta de técnicos qualificados é um desafio que também limita a expansão dessas tecnologias (SILVA *et al.*, 2014).

A ausência de incentivos adequados dificulta a implementação e operação dessas tecnologias (XAVIER *et al.*, 2016).

O PLANARES estabelece diretrizes para diversas diretrizes foram estabelecidas para aprimorar a gestão de resíduos sólidos no Brasil, focando na redução da geração de resíduos e

na diminuição do encaminhamento a aterros sanitários (BRASIL, 2022a). Entre as estratégias mencionadas, destaca-se o tratamento mecânico-biológico, que combina processos mecânicos e biológicos para tratar resíduos sólidos urbanos, reduzindo seu volume e massa. Além disso, a educação ambiental é essencial para conscientizar a população sobre a importância da segregação adequada dos resíduos e o respeito ao ciclo de vida dos materiais, promovendo práticas sustentáveis desde a origem (BRASIL, 2022a).

Outra importante diretriz dos PLANARES (BRASIL, 2022a) é o aproveitamento energético dos resíduos sólidos. Nesse contexto, uma das estratégias é o incentivo à produção e uso de combustíveis derivados de resíduos (CDR). Esses, podem ser utilizados como fonte de energia alternativa, contribuindo para a diversificação da matriz energética do país e reduzindo a dependência de fontes fósseis. Essa abordagem não apenas valoriza os resíduos como recursos energéticos, mas também diminui o volume destinado a aterros.

Para viabilizar essas estratégias, o PLANARES propõe uma articulação entre diferentes esferas governamentais. A colaboração entre governos municipais e estaduais é crucial para impulsionar a obrigatoriedade dos processos de licenciamento ambiental necessários para a implementação dos sistemas de captação e aproveitamento energético (BRASIL, 2022a).

As políticas também destacam a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, bem como o desenvolvimento de programas de capacitação técnica para os profissionais envolvidos na gestão de resíduos. A integração dessas medidas visa criar um ambiente propício para o avanço das tecnologias de tratamento de resíduos no Brasil, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável.

Essas diretrizes e estratégias, delineadas nos PLANARES 2022, são fundamentais para a modernização da gestão de resíduos sólidos no Brasil, alinhando-se às melhores práticas internacionais e contribuindo para a sustentabilidade ambiental e energética do país (BRASIL, 2022a), além de provocar uma relação mais próxima com a NBR 17.100 -1 /23 (ABNT, 2023) que preconiza a hierarquia para o gerenciamento de resíduos sólidos.

2.4.2.1 Métricas e objetivos legais para tratamentos térmicos

Ainda no PLANARES são estabelecidas algumas metas específicas para alcance nos próximos 16 anos. Uma das principais métricas é definida com uma redução do volume

encaminhado para a destinação final para aterros sanitários, recuperando uma porcentagem de 48,1% da massa total de RSU, 14,6 % devem corresponder a recuperação energética a partir de tratamentos térmicos (BRASIL, 2022a).

O aproveitamento de energia é sugerido entre outras tecnologias, por meio dos tratamentos térmicos (BRASIL, 2022a), onde é esperado não só processos de implementação, mas que essa recuperação contribua para a matriz energética do país, abastecendo pelo menos 27 milhões de domicílios até 2040. Indicadores que já eram comuns para resíduos especiais ou industriais, agora está presente também para resíduos sólidos urbanos. Exatamente por metas como essas, sugeridas pelo PLANARES, que a atualização da hierarquia preconizada em 2023, vem para atualizar as referências sobre gestão integrada de resíduos (BRASIL, 2022a).

A ABNT NBR de 17.100-1:2023 apresenta tratamentos alternativos, utilizando de incineração, pirólise e gaseificação como tecnologias a serem adotadas para essa diminuição. Além disso, também se comenta sobre o aproveitamento energético a partir dos tratamentos.

A legislação consegue ser mais atual e ampla para as métricas de incentivos fiscais e educação ambiental, comentando sobre incentivos fiscais e campanhas de conscientização à população sobre a alternativa térmica para o tratamento de resíduos sólidos.

2.4.3 Entraves para o Licenciamento

Os tratamentos térmicos enfrentam algumas limitações, especialmente no âmbito da legislação ambiental. O processo de licenciamento para esses tratamentos é notoriamente complexo, podendo exigir estudos detalhados de impacto ambiental (EIA/RIMA) e o cumprimento rigoroso das normas de controle de emissões atmosféricas, conforme estabelece a Resolução CONAMA nº 316/2002. Embora essas regulamentações sejam essenciais para proteger o meio ambiente e a saúde pública, podem tornar o processo mais oneroso e prolongado, muitas vezes retardando a implementação dessas tecnologias devido às exigências de processos e técnica, além dos altos custos associados que se tornam ponto de divergência para apostarem nas tecnologias (CONAMA, 2002).

Não só a complexidade do processo, mas também os altos investimentos e a carência de infraestrutura podem ser mencionadas como um desafio.

Ao ser mais específico para a legislação mineira, encontra-se outros entraves. A lei nº 21.557/2014, sugere acrescentar dispositivos à lei nº 18.031 de 2012. Por meio dela, o uso de tecnologias de incineração no processo de reaproveitamento energético para resíduos comuns não é permitido e torna excedente a tecnologia para coprocessamento em fornos de fábricas de cimento (MINAS GERAIS, 2014).

Em 2021, houveram manifestações contrárias à incineração e de forma mais clara aos Combustíveis Derivados dos Resíduos Sólidos (CDRS), realizadas por mais de 160 entidades e representantes (GALVANI, 2021).

Esta lei, se mantém e se une à apenas outros dois estados da união que regulamentam a proibição da incineração como tratamento para resíduos sólidos urbanos, podendo ser questionados com relação a hierarquia preconizada e manifestada em ABNT, 2023 que compreende a recuperação energética como uma das rotas tecnológicas a ser considerada na gestão integrada de resíduos. O estado do Ceará proíbe desde 2016 pela própria política estadual de resíduos (CEARÁ, 2016), enquanto que Mato Grosso proíbe desde 2007 por Lei, a própria prática de incineração, de modo direto (MATO GROSSO, 2007). Válido compreender que a proibição se refere apenas à incineração, outras tecnologias de tratamentos térmicos não são mencionadas. Decisões como essas podem ser questionadas uma vez que frente aos 26 estados e mais o distrito federal, apenas três se opõem aos métodos, sem apresentação clara da análise de viabilidade. A própria norma (ABNT, 2023), sugere compreender a aplicação para cada realidade a fim de compreender os prós e contras das diferentes alternativas.

Em relação às demais tecnologias térmicas, que embora não são proibidas, acabam por enfrentar ausência de incentivos e métodos eficientes de aplicação, incluindo a Lei de Crimes Ambientais (BRASIL, 1998). Além disso, as diferentes regulamentações fragmentadas tornam as orientações mais inconsistentes entre os diferentes níveis de governo, podendo dificultar o cumprimento de normas.

Como exemplo, em Minas Gerais, o Decreto 48.107 que complementa o texto da Lei 18.031/2009 que institui os tratamento térmicos no estado, ratifica a proibição de incineração para RSU (MINAS GERAIS, 2020). Ao passo que articula a implementação dos tratamentos

térmicos para resíduos de serviços de saúde que estejam contaminados biologicamente, bem como o estado de São Paulo, pela diretoria colegiada da CETESB (2020).

Excluindo todos os entraves legais e contradições de direcionamentos governamentais, ainda teríamos a resistência social e percepção pública que muitas vezes por falta de informação sobre os benefícios e os verdadeiros riscos da abordagem (MOREIRA, 2012) acabam por se tornar exacerbados.

2.4.4 Desafios e Vantagens

Diante de tudo que foi considerado sobre essa alternativa para o tratamento de RSU, neste tópico busca-se trabalhar os desafios e vantagens do tratamento térmico, destacando sua relevância no contexto brasileiro.

Com o aumento populacional e também a crescente geração de resíduos (ABREMA, 2023), é preciso identificar soluções diferentes e inovadoras para mitigação dos impactos ambientais e que se tornem um progresso frente às comumente utilizadas como aterros sanitários (MOREIRA, 2012). Com isso, já iniciamos a lista de vantagens para a metodologia.

A redução do volume e massa dos resíduos de forma significativa, representa não só uma vantagem como um dos principais motivos para a escolha do modelo de tratamento. Sua eficiência em redução, uma vez que tratamentos como a incineração são capazes de reduzir em até 90% a massa dos RSU, conforme o que apresenta Ramos (2020), diminuem a necessidade de extensos locais para destinação final, trazendo prolongamento da vida útil dos aterros (CAIXETA, 2005).

Ainda trazendo o exemplo da incineração e em apoio a da gaseificação, temos a possibilidade de recuperação energética a partir do tratamento, promovendo calor e eletricidade, que podem ser utilizados em diversas aplicações (RAMOS, 2020).

Segundo Bernal (2009), a busca por novas alternativas de tratamento visa diminuir as emissões de metano na atmosfera. No caso do tratamento térmico, outros gases de efeito estufa podem sofrer diminuição em emissões (CONAMA nº 316/2002), visto que para sua aplicação são exigidas altas e avançadas tecnologias para controle da liberação de poluentes tóxicos (CETESB, 2020).

Algumas vantagens já são conhecidas e abordadas para outros tipos de resíduos como os de serviços de saúde, trazendo maior segurança sanitária no tratamento de patógenos e substâncias perigosas neutralizadas pelas altas temperaturas, como dispõe a Resolução RDC nº 306 (BRASIL, 2004).

No que tange a valorização de outros tratamentos, o próprio Instituto de Pesquisa Técnica (2017) confirma que o aumento da reciclagem, por exemplo, pode aumentar o potencial calorífico dos RSUs, ao segregar os materiais inertes em seu processo.

Por fim, o produto gerado da incineração, não precisa ser encaminhado para destinação final, mas as cinzas podem ser reaproveitadas na construção civil, contribuindo para economia circular (Mendonça, 2018).

Ainda segundo Mendonça (2018), os principais desafios que abordam a implementação dos tratamentos térmicos incluem uma revisão da complexidade de instalação. Por meio do licenciamento ambiental e as diferentes etapas do processo se faz necessário uma operação complexa e comprovadamente eficiente, exigindo profissionais qualificados e onerosos ao processo.

Incluindo os altos custos de implementação de operação que exigem altos investimentos iniciais, os tratamentos térmicos como a incineração apresentam custo de disposição maior que os aterros (IPT, 2017), se tornando impeditivo especialmente para municípios com recursos limitados e com baixa capacitação técnica para a operação de gestão contínua e eficiente. O relatório do Banco Mundial (2012) "What a Waste" também aponta que os custos de incineração são significativamente mais altos em países em desenvolvimento, onde a capacidade técnica e financeira para operações complexas é limitada.

São pontos como esses que também estimulam a resistência da comunidade e uma má percepção pública do modelo de tratamento por meio de incineração e pirólise como supracitado no tópico de Entraves para o Licenciamento.

Bem como as vantagens, existem desvantagens que podem ser compartilhadas com todas as metodologias alternativas de tratamento (CAIXETA, 2005), os processos da hierarquia preconizada que antecedem a recuperação energética precisam ser rigorosamente estruturados. Desde a coleta de transporte até a segregação de resíduos, é preciso promover melhorias

significativas nos valores e indicadores. Esse fator, pode ser analisado como um estímulo e até, uma vantagem de certa forma, se avaliar a progressão de todas as etapas de maneira simultânea.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do município

O município de Juiz de Fora está localizado na Zona da Mata de Minas Gerais, com uma população de aproximadamente 573.285 habitantes (IBGE, 2024). A cidade é um importante centro econômico e educacional da região, com uma economia diversificada baseada na indústria, comércio e serviços, como indica o Plano Diretor da Cidade (2018). Com muitas influências de capitais próximas, existem referências da cidade de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, por estar estrategicamente localizada próxima desses grandes centros comerciais (JUIZ DE FORA, 2018).

Tendo um clima classificado como tropical de altitude, Cwa segundo Köppen, com dois períodos distintos, Juiz de Fora apresenta verões quentes e úmidos e invernos amenos e secos, segundo Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental (Prefeitura de Juiz de Fora, c2021).

Uma economia diversificada e dinâmica, com destaque para os setores de indústria, comércio e serviços. Ao abrigar um parque industrial robusto, com empresas dos setores de metalurgia, alimentos e bebidas, têxtil e farmacêutico, entre outros. O comércio é outro pilar econômico, beneficiado pela localização estratégica que atrai consumidores de regiões vizinhas.

Os serviços são o principal motor da economia local, especialmente nas áreas de saúde, educação e tecnologia. Juiz de Fora é conhecida pelas suas instituições de ensino superior, como a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), que desempenha um papel na formação de mão de obra qualificada e na promoção de inovação e pesquisa.

Quando se fala de desemprego, a cidade apresenta uma taxa relativamente baixa em comparação com a média nacional segundo Censo IBGE (2024). O ranking ocupacional de Juiz de Fora, considerando o número de pessoas empregadas, ocupa o 4º lugar no estado de Minas Gerais como um dos municípios que mais gerou emprego. De maneira análoga, ocupa o primeiro lugar para a região geográfica imediata. A própria diversificação de setores, garante oportunidades de emprego nas mais diversas áreas.

3.1.1 Aspectos Socioeconômicos

Juiz de Fora é uma cidade com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) considerado elevado, sendo 0,778 pela classificação do IBGE (2024). Isto reflete bons indicadores de saúde, educação e renda. A cidade possui uma rede de saúde pública e privada bem desenvolvida, com hospitais de referência que atendem tanto a população local quanto a de municípios vizinhos.

Na educação, além da UFJF, a cidade conta com diversas outras instituições de ensino, não só superior, mas técnico e centros de pesquisas, o que contribui para a formação de um capital humano mais qualificado (PJF, 2024). Considerando a escolaridade do ensino básico ao fundamental, tem-se uma taxa superior a 93%, conforme aponta o último Censo (BRASIL, 2022).

A caracterização de Juiz de Fora evidencia uma cidade com potencial significativo para o desenvolvimento sustentável, como apontam relatórios do SINIR e dados do SNIS de 2022. O Censo IBGE (2019) sugere um índice de sustentabilidade de 0,696, se posicionando em 61º diante dos 597 municípios do ranking estadual. Nos aprofundando no saneamento básico, principalmente esgotamento sanitário, Juiz de Fora se apresenta com uma das melhores infraestruturas da região estando à frente dos outros 28 municípios desde 2010 (BRASIL, 2019).

A combinação de uma economia diversificada, mão de obra qualificada e infraestrutura adequada cria um ambiente propício para o avanço de políticas ambientais que promovam a sustentabilidade (RAMOS, 2020).

3.1.2 Histórico de RSU na cidade

A gestão de resíduos sólidos urbanos é um desafio muito comum para diversos municípios brasileiros, e Juiz de Fora também é contemplado por esse desafio. Para o município, esse cenário tem evoluído significativamente nas últimas décadas, pelo que apresenta os panoramas do SNIS (BRASIL, 2023b). Os primeiros registros, datados de 2002, mostram que inicialmente o manejo era caracterizado pela ausência de infraestrutura adequada, pelo uso de lixões a céu aberto e também pelo baixo teor de dados e informações mencionadas.

Em 2004, foi inaugurado o Aterro Sanitário do Salvaterra, que substituiu os antigos lixões e passou a receber os resíduos urbanos do município. Esse aterro foi projetado seguindo rigorosos critérios ambientais, conforme o relatório anual de gestão ambiental do município (2015). Ainda assim, não representava a destinação de todo o resíduos gerado, pelo que indica os valores do SNIS (BRASIL, 2023b), afinal, atualmente, não é o aterro de destinação para os resíduos do município.

Segundo um estudo realizado pela prefeitura de Juiz de Fora (2010), os lixões a céu aberto foram a principal forma de destinação e/ou tratamento de resíduos até a implementação de políticas públicas mais rigorosas. A situação começou a mudar com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), com a instituição, Juiz de Fora deu início a um processo de modernização da sua gestão de resíduos. Em 2014, a cidade implementou seu Plano de Saneamento Básico, que foi um marco importante para a melhoria dos serviços de coleta, transporte e destinação final de resíduos, especificando o pilar de resíduos sólidos, o plano apresentou indicadores importantes e que definiram um desafio comparado com o histórico mais realista e recente do município. Para conhecimento, o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS, 2021) do município, é muito recente e continua a destacar como principais metas a erradicação dos lixões, a ampliação de coleta seletiva. Além de promover a reciclagem, por meio da inclusão dos catadores, identificar a capacidade limitada dos aterros sanitários e validar a necessidade de melhorar as rotas tecnológicas que antecedem a disposição final, o PMGIRS foi um ponto de inflexão para a gestão de resíduos.

Apesar dos avanços, a gestão de RSU em Juiz de Fora ainda enfrenta desafios significativos. A coleta seletiva, por exemplo, ainda é insuficiente para atender a toda a demanda da cidade e alcançar toda a população. Dados da última coleta do SINIR (BRASIL, 2019), conferem um índice de 0,26% de recuperação de resíduos. Outro desafio é a conscientização da população. Estudos de Oliveira (2019) indicam que muitos moradores ainda não separam adequadamente seus resíduos, o que dificulta o processo de reciclagem e aumenta a quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário. Os dados do SNIS para 2022, demonstram que uma massa de materiais reciclados recuperados foi de 906,1 t (BRASIL, 2023b).

De acordo com o Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEF-MG), o percentual de resíduos recicláveis coletados aumentou de forma consistente, refletindo um maior compromisso com

a sustentabilidade. Recentemente, Juiz de Fora tem investido em campanhas de educação ambiental e em parcerias com associações de catadores, visando aumentar a taxa de reciclagem e a inclusão social. Essas estatísticas são melhores apontadas pelo PMGIRS de 2021 que apresenta diretrizes específicas sobre a evolução dos tratamentos.

Com o aumento do volume de resíduos sendo destinados a unidades de tratamento e triagem antes da disposição final (BRASIL, 2023b), as diretrizes do plano municipal indicam progresso do gerenciamento para práticas mais sustentáveis e eficientes.

3.1.3 Gestão e gerenciamento de RSU

A gestão de resíduos sólidos em Juiz de Fora é executada pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DEMLURB) que se trata de uma entidade autárquica, com autonomia técnica e financeira e responsável pela gestão da limpeza e manutenção urbana da cidade. Instituída e criada pela Lei nº 5.517 (JUIZ DE FORA, 1978) envolve a coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos. Atualmente, a cidade enfrenta desafios relacionados à infraestrutura inadequada, baixos índices de reciclagem e a dependência de aterros sanitários para a disposição final dos resíduos (BRASIL, 2022a).

Segundo dados do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS, 2021), Juiz de Fora gera aproximadamente 500 toneladas de RSU por dia. A coleta seletiva ainda é incipiente, abrangendo uma pequena parcela da população, o que limita o potencial de reciclagem e compostagem na cidade. A maior parte dos resíduos é destinada ao aterro sanitário, que, apesar de operar dentro das normas ambientais, está se aproximando de sua capacidade máxima.

Considerando as rotas tecnológicas do município, é possível avaliar alternativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos, considerando a proposta de evitar o alto volume destinado aos aterros sanitários.

3.2 Ferramentas de Rotas e Custo

No contexto do tratamento e gestão de resíduos sólidos urbanos, a ferramenta de “Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU” do Governo Federal (PAULA; REICHERT, 2022) se destaca como uma inovação tecnológica essencial. Ela foi desenvolvida para auxiliar

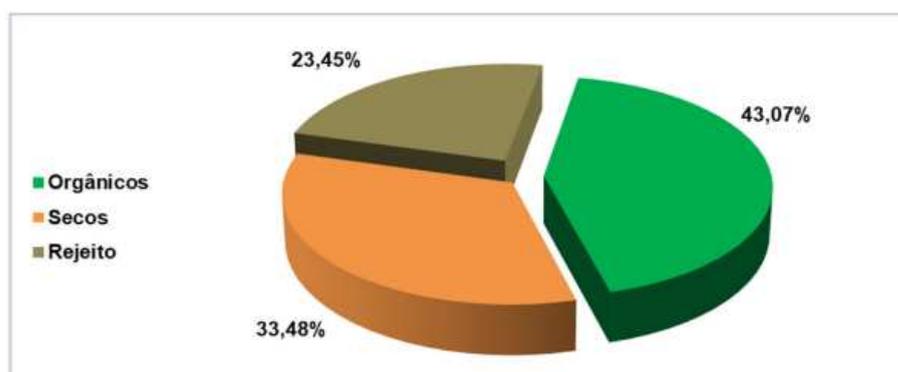
os municípios a tomarem decisões adequadas e seguras no que tange a gestão de resíduos, fornecendo insumos coerentes. Essa plataforma permite a simulação de diferentes rotas tecnológicas a serem inseridas na gestão de resíduos, considerando variáveis como gravimetria, tipo de resíduo, capacidade de coleta e geração per capita resultando em fluxos e balanços de massa a depender da simulação desenvolvida.

Além disso, a ferramenta possibilita a análise de diferentes cenários, o que é crucial para a tomada de decisões mais assertivas no planejamento e gestão de resíduos. O uso dessa tecnologia é um passo importante para municípios que buscam aprimorar suas práticas de gestão, alinhando-se às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e contribuindo para a sustentabilidade urbana.

Por meio dessa ferramenta, busca-se avaliar o processo e o planejamento para atingir os objetivos e diretrizes das regulamentações vigentes. Essa ferramenta reflete uma crescente necessidade de profissionalização e tecnificação na gestão pública, especialmente em áreas críticas como a gestão de resíduos sólidos, estimulando a correta declaração de dados e documentações específicas de forma adequada, podendo apresentar impactos diretos na saúde pública e na qualidade de vida da população.

Considerando os diferentes tipos de resíduos, tem-se o panorama apresentado na Figura 4 para a cidade de Juiz de Fora.

Figura 4. Composição gravimétrica dos RSD do Município de Juiz de Fora



Fonte: PMGIRS (2021) apud DEMLURB (2018b)

Justamente por essa diversidade, a ferramenta indica alguns dados importantes a serem considerados, como a própria gravimetria dos resíduos sólidos do município.

A ferramenta indica e sugere a subdivisão do tipos de resíduos se diferenciando em cada material dos resíduos, enquanto que as apresentadas na composição de Juiz de Fora pelo PMGIRS (2021) detalha apenas por tipo de resíduos sem ser específico para os diferentes materiais, foi preciso, por tanto, detalhar os números padronizados pelo modelo. Utilizando a proporcionalidade, para o município de Juiz de Fora, encontra-se 43,07% de resíduos orgânicos e 33,48% de secos, enquanto o restante são rejeitos (PMGIRS, 2021). O que compreende cerca de 76% dos resíduos com possibilidade de ser recuperado, valores estes que estão melhor mencionados na Tabela 1, indicando subdivisões entre secos e orgânicos.

Tabela 1. Composição Gravimétrica para aplicação em ferramenta

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA			
CATEGORIA	PADRÃO BR	PMGIRS	PROPORÇÃO
resíduos de alimentos	48,4%	43,07%	43,07%
papel, papelão	13,1%	12,9%	12,90%
plástico filme	8,9%	16,28%	10,73%
plásticos rígidos	4,6%		5,55%
vidros	2,4%	3,12%	3,12%
metais ferrosos	2,3%	1,18%	0,94%
metais não ferrosos	0,6%		0,24%
resíduos verdes (jardins e parques)	3,0%	23,45%	3,57%
têxteis	2,6%		3,09%
borracha, couro	0,7%		0,83%
fraldas descartáveis e similares	4,0%		4,76%
madeira	4,7%		5,59%
resíduos minerais	0,0%		0,00%
outros	4,7%		5,59%
SOMATÓRIO	100,0%		100%

Fonte: Autoria própria (2024) adaptado de PMGIRS (2021)

Na intenção de compreender melhor os cenários para a cidade de Juiz de fora, além da composição e dados de densidade de geração, foram aplicadas simulações que validem diferentes diretrizes comentadas pelo PLANARES (BRASIL, 2022a).

3.3 Cenários de aplicação

A possibilidade de avaliar cenários diferentes, se converge com a proposta do PLANARES (BRASIL, 2022a) que apresenta um horizonte objetivo de mudanças e evoluções para o que tange o gerenciamento de resíduos sólidos. No fim, o objetivo foi diagnosticar indicativos que corroborem para planejar estratégias interessantes diante do Plano Nacional.

Por meio da ferramenta “Rotas e Custos” foi desenvolvido fluxogramas de massa para cada um dos três cenários. Para além dos dados inseridos de forma manual, como supracitado anteriormente, a própria modelagem apresenta uma diversidade de variáveis avançadas que consideraram eficiências das etapas e rotas tecnológicas.

Considerando uma proposta mais conservadora, as variáveis avançadas foram definidas para condições de baixa eficiência. Além disso, os valores definidos pelo PLANARES se tornaram um cenário único, definindo um fluxo de massa específico para o alcance de suas metas.

Para a consideração comparativa, na Tabela 2 se apresenta os três cenários desenvolvidos.

Tabela 2. Cenários e metas de projeções para análise de fluxo de massa

Cenário	Descrição	Metas de Projeção
1	Base de Juiz de Fora referente ao ano de 2024	<ul style="list-style-type: none">- População 582.886 habitantes;- geração per capita de RSD em 1,28 kg/hab.d;- massa diária considerada na rota 746,1 t/d- Com 1,1% de coleta de seletivos- Ausência da coleta de orgânicos
2	Base de Juiz de fora referente ao ano de 2040	Considerando as mesmas estatísticas atuais com progressão populacional e de geração de resíduos para 2024. <ul style="list-style-type: none">- População 608.582 habitantes;- Geração per capita 1,49 kg/hab.d;- Massa diária de resíduos domésticos consideradas 906,8 t/d- Os mesmos 1,1% para coleta de seletivos- Ausência da coleta de orgânicos
3	Proposta PLANARES referente a 2040 para Juiz de Fora	Recuperação de 48,1% dos RSU que não serão destinados a aterros; Destes, 13,5% serão recuperados por tratamento biológico, e destes, 4% por digestão anaeróbia; Outros 20% devem ser recuperados por meio de reciclagem; Outros 14,6% devem ser destinados ao tratamento térmico; Além de uma coleta seletiva para resíduos secos que contemple 72,6% e uma eficiência mínima de 50% na captação do biogás de aterro para aproveitamento. Considerando 50% das embalagens sendo recuperadas por logística reversa.

Fonte: Autoria própria (2024), adaptado de Brasil, 2022a.

A partir dos cenários estabelecidos foi preciso realizar uma projeção populacional com base no PMGIRS para compreender as rotas necessárias, além da projeção da geração per capita. Definidas de forma mais específicas no tópico de condições de contorno.

3.4 Condições de contorno para a ferramenta

A ferramenta de rotas e custos do governo para resíduos sólidos exige parâmetros que delimitam e influenciam o planejamento das rotas de coleta e o cálculo dos custos operacionais.

São essas condições de contorno que vão gerar os fluxogramas de resultado e apresentar balanço de massa de acordo com os interesses que o PLANARES propõe. Alguns desses parâmetros, já supracitados, precisam se diferenciar por cenário (Brasil, 2022a).

No que tange às tomadas de decisões possíveis, ‘*geração per capita*’ foi definida ao invés da ‘*massa total*’, por apresentar um volume maior proporcionalmente. De forma análoga ao que foi decidido por ‘*nível de eficiência*’, a decisão foi tomada sugerindo maior conservadorismo ao modelo, evitando inadequações ao modelo.

Considerando os níveis de eficiência, utilizados temos os seguintes intervalos, apresentados na tabela de 3.

Tabela 3. Níveis de eficiência utilizados na ferramenta de Rotas e Custos (Continua)

TRIAGEM:	Eficiência da triagem de resíduos (%)			
	Orgânicos	Recicláveis secos		
	Mecanizada mistos	Mecanizada mistos	Mecanizada seletivos	Manual seletivos
Baixa	85	75	75	75
TRATAMENTO BIOLÓGICO:	Biodigestão			
	Biogás		Energia líquida	
Geração potencial	Nm ³ /t		kWh/t	
Baixo	80		120	

Fonte: Autoria própria (2024) adaptado de Ministérios das Cidades (2024).

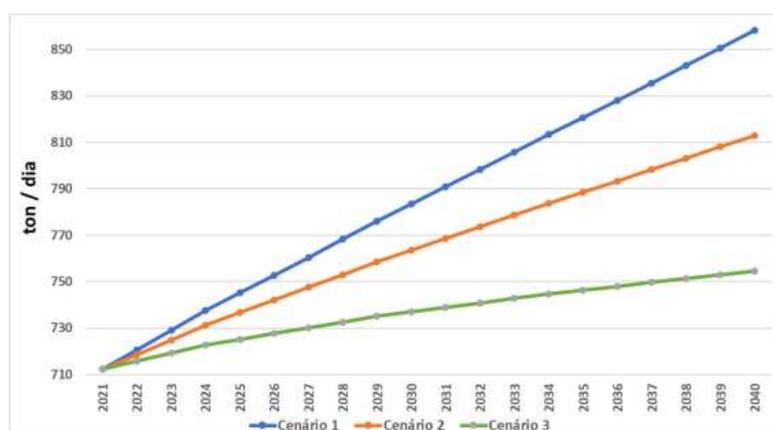
Tabela 3. Níveis de eficiência utilizados na ferramenta de Rotas e Custos (Continuação)

TRATAMENTO BIOLÓGICO:	Biodigestão e compostagem	
	Perda de massa (%)	
	Biodigestão	Compostagem
Baixa	10	30
TRATAMENTO BIOLÓGICO:	Compostagem	
	Rejeito na peneira pós-compostagem (%)	
Baixo	5	
INCINERAÇÃO:	%	
eficiência na geração de energia elétrica	21,6	
geração de cinzas	20	
recuperação de metais das cinzas	90	
ATERRO SANITÁRIO:	Eficiência na Captação do Biogás (%)	
Alta	50	

Fonte: Autoria própria (2024) adaptado de Ministérios das Cidades (2024).

Utilizando a projeção apresentada pelo PMGIRS (2021) para as definições desse valores, tem-se o seguinte gráfico (Figura 5) para definição de cada um deles a depender do cenário.

Figura 5. Comparação da Geração total diária de resíduos em Juiz de Fora em três possíveis cenários.



Fonte: PMGIRS, 2021.

Considerando os três modelos de projeções identificados pelo Plano de Gerenciamento do município (2021), foi decidido por utilizar o modelo nomeado como ‘Cenário 1’, por corresponder uma geração mais acelerada e fornecer um volume de resíduos maior (PMGIRS,

2021). Essa decisão tende a ser mais conservadora, considerando o pior cenário de geração, e ainda assim, estaria dentro da média nacional próxima de 1,2, segundo o Planares (Brasil, 2022a). A Tabela 4, apresenta a projeção dos valores definidos no cenário 1.

Quadro 2. Projeção populacional e de geração de resíduos sólidos pelo cenário 1 no intervalo de 2024 a 2040.

Ano	População total (hab)	Geração per capita de resíduos sólidos (kg/hab/dia)	Geração diária de resíduos sólidos (ton/dia)	Geração anual de resíduos sólidos (ton/ano)
2024	582.886	1,28	746	232.781
2025	584.868	1,29	754	235.398
2026	586.857	1,3	763	238.029
2027	588.852	1,31	771	240.676
2028	590.854	1,33	786	245.181
2029	592.863	1,34	794	247.864
2030	594.404	1,35	802	250.363
2031	595.950	1,36	810	252.874
2032	597.499	1,38	825	257.259
2033	599.053	1,39	833	259.797
2034	600.610	1,4	841	262.346
2035	601.932	1,42	855	266.680
2036	603.256	1,43	863	269.149
2037	604.583	1,44	871	271.627
2038	605.913	1,46	885	276.005
2039	607.246	1,47	893	278.507
2040	608.582	1,49	907	282.918

Fonte: Autoria própria (2024) adaptado de PMGIRS (2021).

Na tabela 4, é possível analisar os valores definidos para condições de contorno referente à Juiz de Fora no ano de atualidade.

Tabela 4. Condições de contorno para o cenário base de Juiz de Fora em 2024

IMPUT PARA ROTA BASE 2024			
CONDIÇÃO	VALOR	UNIDADE	REFERÊNCIA
Populacional	582.886	habitantes	IBGE, 2022
Geração per capita	1,28	kg/hab/dia	PMGIRS 2021
coleta seletiva	8,36	t/d	PMGIRS 2021
coleta orgânicos	ausente		PMGIRS 2021
triagem manual	100%	%	PMGIRS 2021

Fonte: Autoria própria, 2024

Para esse primeiro cenário, os dados do PMGIRS datado de 2021, contribuíram para referenciar os valores de modo conservador ao que a ferramenta sugere.

Na tabela 5, encontra-se o segundo cenário, onde as condições de manejo e tratamentos se mantiveram, apenas com a progressão habitacional e de geração de resíduos per capita, ajustada proporcionalmente.

Tabela 5. Condições de Contorno para o cenário base de Juiz de Fora em 2040.

IMPUT PARA ROTA BASE 2040			
CONDIÇÃO	VALOR	UNIDADE	REFERÊNCIA
Populacional	608.582	habitantes	IBGE, 2022
Geração per capita	1,49	kg/hab/dia	PMGIRS 2021
coleta seletiva	10,16	t/d	PMGIRS 2021
coleta orgânicos	ausente		PMGIRS 2021
triagem manual	100	%	PMGIRS 2021

Fonte: Autoria própria, 2024

Por fim, tem-se o último cenário, com ajustes em condições de tratamento e performance de cada um destes definidos. Para a definição dos valores, foi levado em consideração as métricas de PLANARES (BRASIL, 2022a), fomentando práticas mais constantes de manejo e gestão integrada de resíduos.

Tabela 6. Condições de Contorno para o cenário PLANARES de Juiz de Fora em 2040.

IMPOT PARA ROTA PLANARES 2040			
CONDIÇÃO	VALOR	UNIDADE	REFERÊNCIA
Populacional	608.582	habitantes	IBGE, 2022
Geração per capita	1,49	kg/hab/dia	PMGIRS,2021
coleta seletiva	136,02	t/d	REICHERT, 2022
coleta orgânicos	63,48	t/d	REICHERT, 2022
triagem manual	36	%	REICHERT, 2022

Fonte: Autoria própria, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

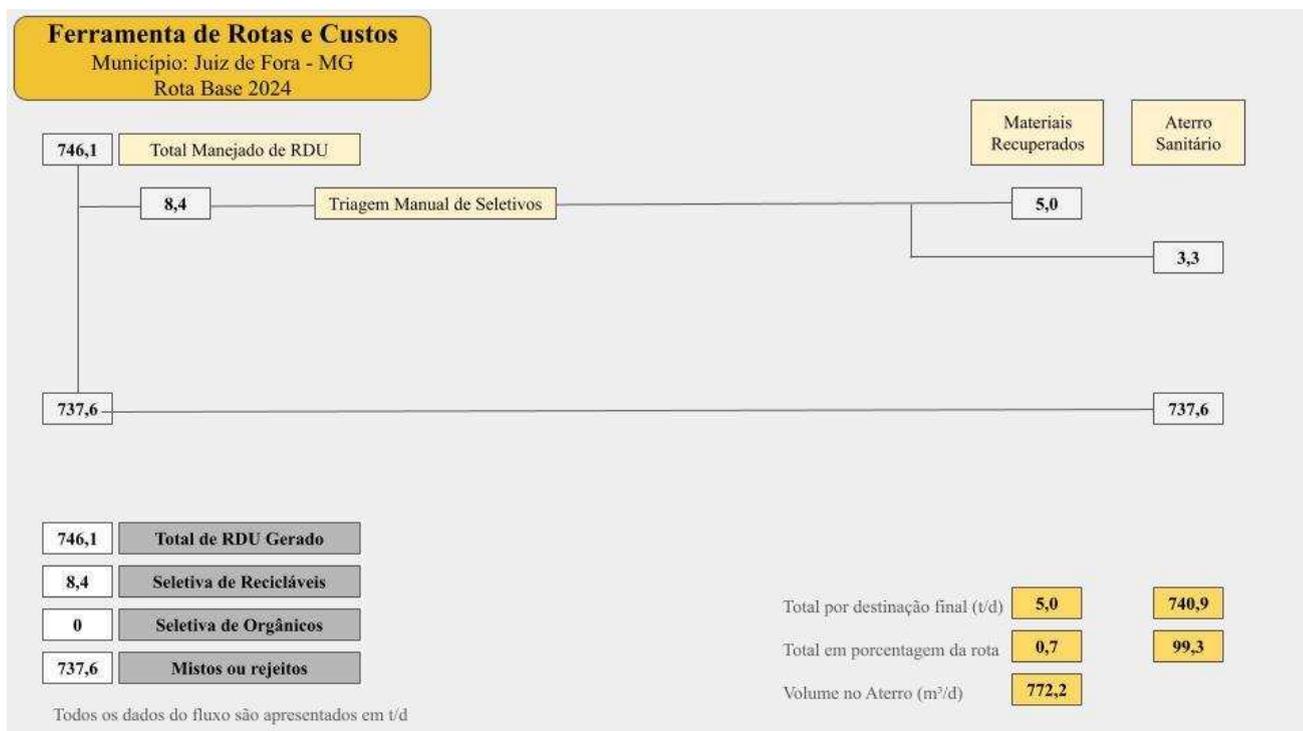
Diante da simulação realizada pela ferramenta de Rotas e Custos disponibilizada pelo governo, é possível definir uma projeção de balanço de massa para os resíduos e diagnosticar novas alternativas de tratamento para o manejo de resíduos do município de Juiz de Fora (PAULA; REICHERT, 2021).

Como comentado em tópicos anteriores, esse processo foi realizado três vezes, considerando os três cenários que foram avaliados comparativamente.

Ao projetar melhoria em todas as rotas tecnológicas que sugere a hierarquia preconizada (ABNT, 2023), é possível compreender a importante lacuna que os tratamentos preenchem na gestão integrada de resíduos, antes da disposição final propriamente dita.

Considerando as projeções base de 2024 e 2040, temos os seguintes cenários apresentados nas Figuras 6 e 7.

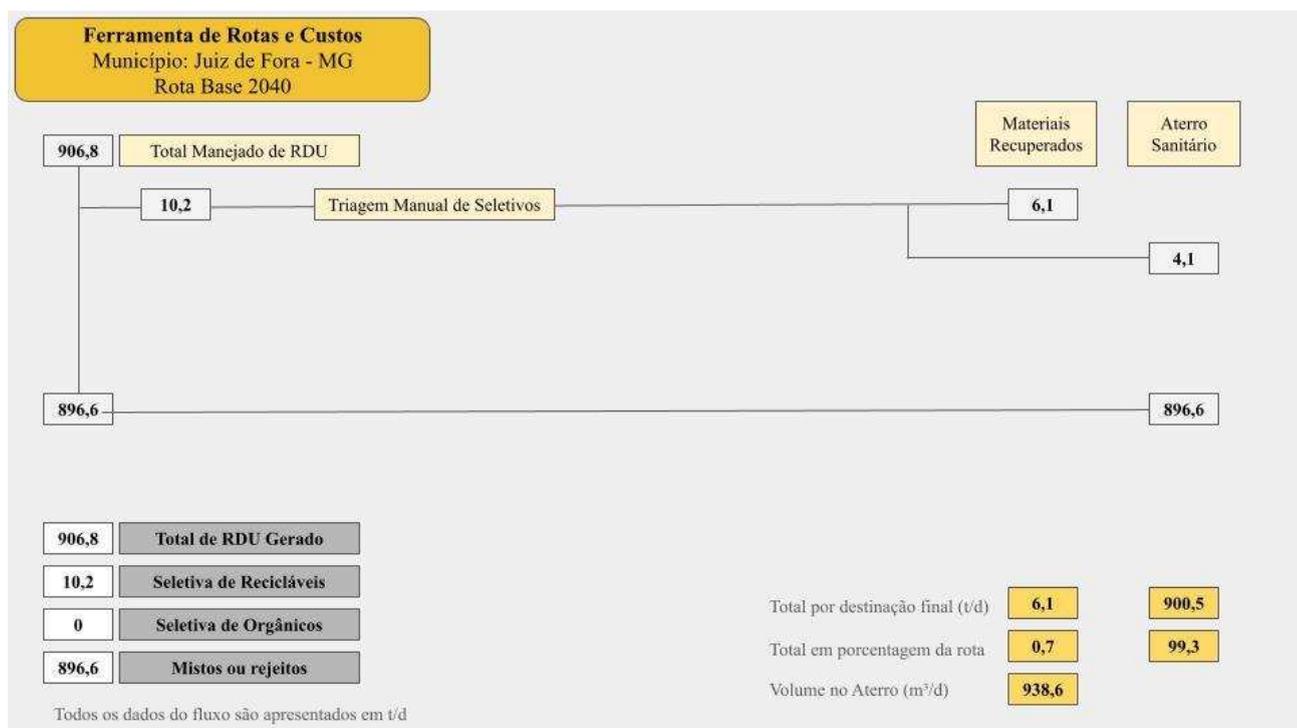
Figura 6. Fluxo de massa para o cenário base de Juiz de Fora em 2024



Fonte: Autoria própria, a partir de BRASIL, 2024.

Neste primeiro cenário, temos atualmente, uma recuperação próxima de 0,7%, podendo ser considerada muito incipiente quando comparada às metas do PLANARES (BRASIL, 2022a). Até porque, neste cenário, os resíduos recuperados foram obtidos de apenas uma maneira, com a reciclagem.

Figura 7. Fluxo de massa para o cenário base de Juiz de Fora em 2040



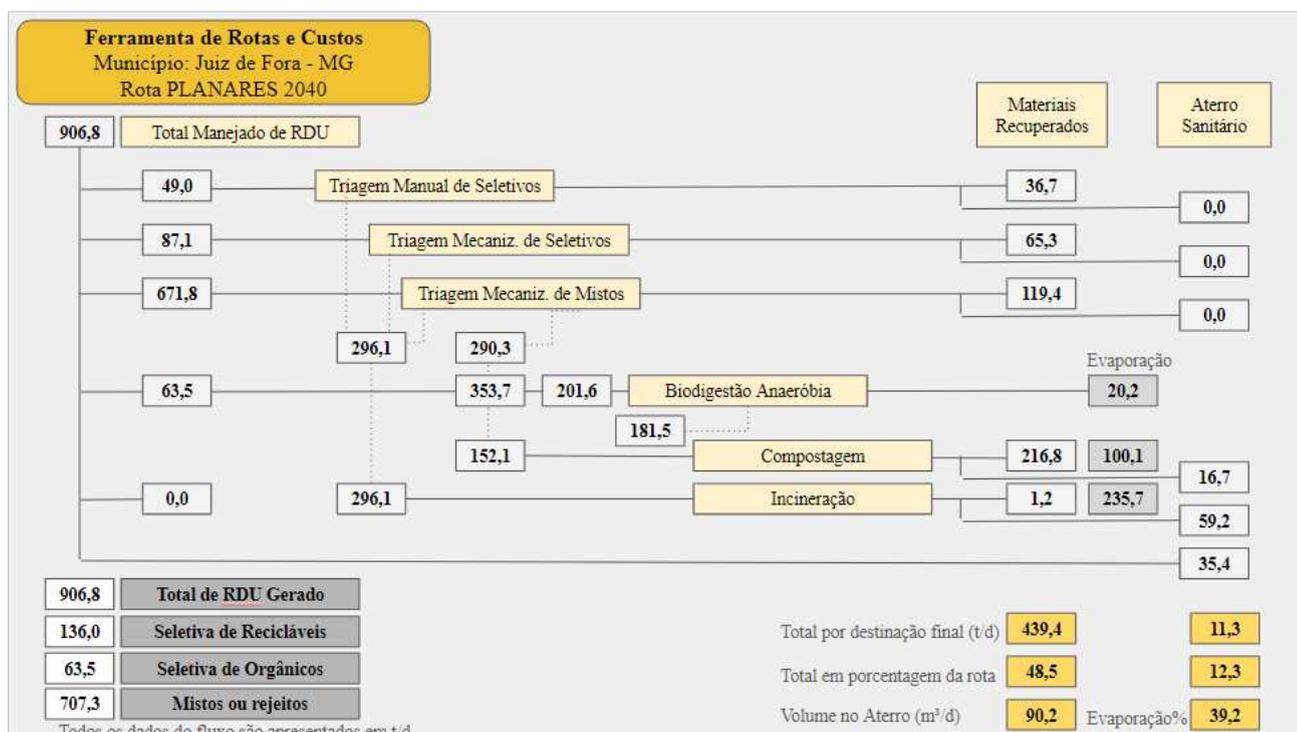
Fonte: Autoria própria, a partir de BRASIL, 2024.

Ao avaliar esses valores com as metas que o PLANARES (BRASIL, 2022a) sugere para os respectivos anos de 2024 e 2040, existe uma significativa diferença. Considerando que cerca de 14% dos resíduos deveriam ser recuperados no ano vigente, e pela modelagem, e condições atuais de gerenciamento esse valor não alcança 6% das expectativas. Ao revelar esse distanciamento ao ano de 2040, ela é ainda maior, considerando os 48,1% de resíduos a serem recuperados, as atuais condições não permitem o atingimento de 1% em resíduos recuperados.

O cenário ideal para 2040, se altera na construção e implementação de tratamentos térmicos, além de assumir melhorias significativas na triagem, evitando sobrecarga de rotas tecnológicas do final da hierarquia e valorizando as etapas anteriores que são fundamentais para a gestão integrada.

Outra avaliação importante para considerar as vantagens do modelo é o volume do aterro sanitário que seria ocupado, ambos os cenários com valores superiores a 700 m³/d.

Figura 8. Fluxo de massa para o cenário ideal de Juiz de Fora em 2040



Fonte: Autoria própria, a partir de BRASIL, 2024.

Com esse terceiro cenário, as metas consideradas para recuperação foram atingidas com certas vantagens, uma vez que solicitava-se 48,1% (BRASIL, 2022a) e temos o valor de 48,5%. Bem por isso, ele é considerado a alternativa proposta para implementação no município. Importante ressaltar que as definições de recuperação para a ferramenta são diferentes das consideradas pelo PLANARES. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, compreende, recuperação a massa e o percentual de resíduos que não foram encaminhados para o aterro (BRASIL, 2022a), dessa maneira os valores percentuais considerados por eles são calculados de maneira diferente.

Ao analisar a Figura 8, é possível concluir que existe um déficit na redução dos resíduos maior para a incineração do que o considerado pelo fluxo. Utilizando a massa de resíduos destinada à incineração e descontando o valor encaminhado para aterro sanitário, tem-se no cálculo de recuperação um percentual ainda maior de 74,45% de resíduos.

Considerando as demais metas do PLANARES, apresenta-se no quadro 3 para corroborar com as análises de cálculo em percentual.

Quadro 3. Comparativo dos resultados definidos pelo Cenários PLANARES 2040

Modelo de tratamento destinado	Massa total diária (t/d)	% em relação à massa total de RSD	Meta do PLANARES para 2040
tratamento biológico	237,0	26,1	13,5%
reciclados	221,4	24,42	20%
tratamento térmico	296,1	32,65	14,6%

Fonte: Autoria própria, a partir de BRASIL, 2024.

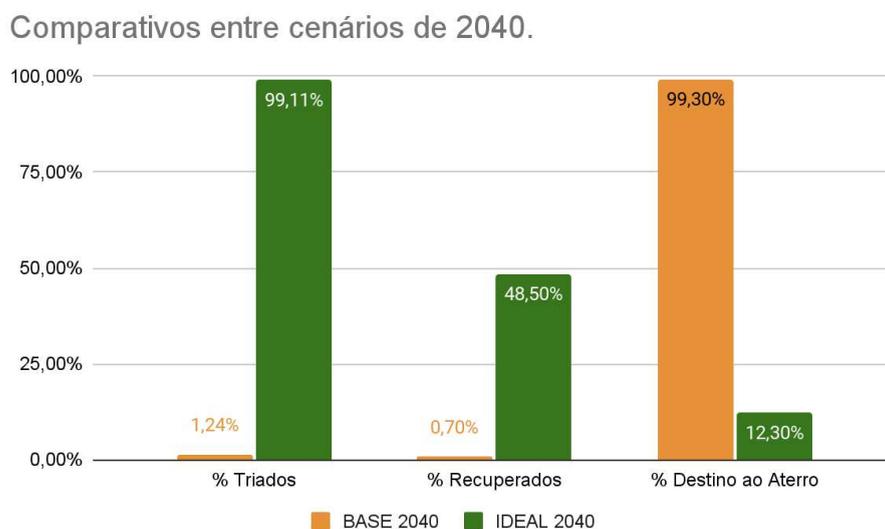
Com base nas condições de contorno avaliadas, será necessário uma melhora no índice de separação atual na fonte geradora, favorecendo o percentual de encaminhamentos para a triagem e reciclagem diretamente (WILLIAMS, 2013). Vale ressaltar que foram considerados os Resíduos Domésticos.

Um dos entraves da ferramenta está relacionada com a massa mínima que precisava ser destinada à triagem mecanizada, sendo ela no valor de 50 t/d (BRASIL, 2021). Considerando essa limitação, foi delimitado 36% dos resíduos para triagem manual e os outros 64% para mecanizada. E ainda assim, esse valor corrobora com 49,0 t/d de toda a massa recuperada sendo triada manualmente, sem ultrapassar as 50 t/d, limite máximo a ser destinado para triagem manual.

Além da reciclagem, a recuperação também foi avaliada pelo percentual destinado a tratamentos biológicos e térmicos, dessa maneira, aproximadamente 12,3% de todo o resíduo gerado será destinado ao aterro. Um cenário que corrobora com todas as etapas da hierarquia idealizada pela ABNT NBR 17.100-1:23 (2023).

De forma objetiva, é possível fazer um comparativo entre os percentuais dos cenários de 2040. Observe os valores de diferenciação e vantagens frente às metas estipuladas para 2040 apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1. Comparativos entre os cenários 2040

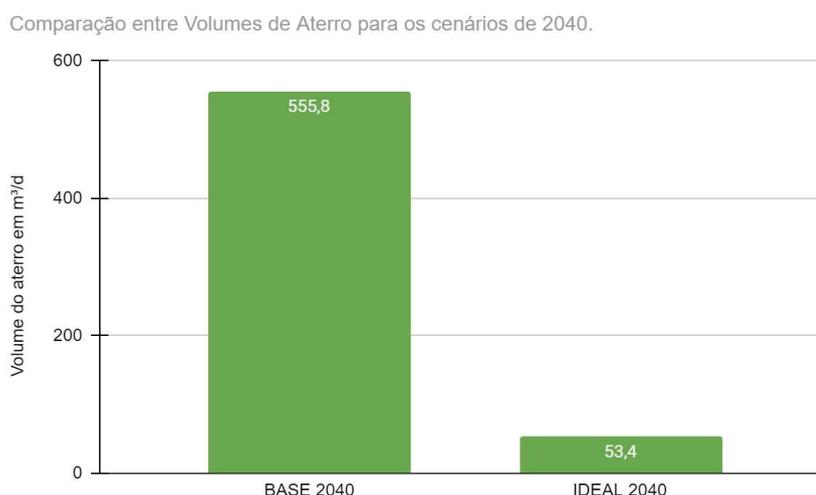


Fonte: Autoria própria, 2024.

Nota-se a vantagem do cenário Ideal 2040 que diminui a massa destinada ao aterro em até 10x, considerando as porcentagem, do que é recuperado em triagem e o que é destinado ao aterro, ainda existe a compensação que é recuperado energeticamente.

Além da vantagem para diminuir o volume destinado aos aterros, consequentemente estamos valorizando o ciclo de vida útil desses aterros, apresentando vantagens econômicas para o investimento (DASKALOPOULOS; BADR; PROBERT, 1998). O gráfico 2 apresenta o comparativo entre os cenários de 2040 sobre o volume destinado aos aterros.

Gráfico 2. Comparativo entre os cenários de 2040, em relação ao volume destinado a aterros sanitários.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A ferramenta apresenta certas limitações quanto à construção dessas simulações. Primeiramente, por ser programada para Resíduos Sólidos Urbanos, ela considera um volume relativamente maior, como sugere o próprio Manual da Ferramenta (BRASIL, 2021). De modo análogo, se apresenta para grandes centros, uma vez que o valor limite considerado para o tratamento térmico é muito próximo ao volume total gerado pelo município de Juiz de Fora.

Definitivamente, a ferramenta estipula que para um custo de investimento interessante, o tratamento térmico precisaria apresentar cerca de 500 t/d para o destino. No entanto, esse é praticamente a metade do valor projetado para o total de resíduos gerados pelo município diariamente. Uma solução viável para esse limite seria os consórcios municipais que estariam disponibilizando o somatório dos resíduos.

Atuando a favor da tecnologia, já constam alguns países que utilizam tratamentos térmicos para resíduos sólidos com volumes diários inferiores a 500 toneladas diárias de geração. A Suécia, por exemplo, embora tenha um sistema avançado de incineração e suas cidades menores que adotam outras tecnologias térmicas eficientes, apresentam volumes reduzidos de geração (ONU, 2019).

Algumas ilhas e áreas rurais do Japão usam tratamentos térmicos para resíduos sólidos abaixo de 500 t/d, especialmente com foco em aproveitamento energético (Souza, 2021).

Por fim, um comparativo no potencial de energia elétrica produzido foi possível realizar com os cenários propostos. No caso, apenas o último cenário apresenta produção de energia elétrica como subproduto, sendo possível gerar 76.308,0 kWh. A nível de comparação, uma casa brasileira consome em média 152,2 kWh/mês (RODRIGUES; GONÇALVES; SANTOS, 2018). Segundo os mesmos autores, essa média pode ser ainda maior nas regiões mais desenvolvidas como o Sul e Sudeste. O valor do subproduto, poderia ser suficiente para prover energia elétrica para um pouco mais de 500 residências, mensalmente. A nível de comparação, é possível analisar uma recente atualização da matriz energética do município de Juiz de Fora, que apresentou a inauguração da primeira usina fotovoltaica. A usina é composta por 1758 módulos e 4 inversores, gerando energia suficiente para abastecer aproximadamente cerca de 777 casas populares mensalmente (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2024).

CONCLUSÃO

Tendo como base o modelo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos aplicado em Juiz de Fora, foi que o presente estudo foi concluído. O município, objeto de estudo, apresenta algumas vantagens que se tornaram diferenciais para o trabalho. Isso porque, estamos falando de uma cidade onde existe sistema de controle e monitoramento de resíduos, gerenciado pela administração pública, permitindo acesso e aprofundamento dos fluxos e informações geradas.

Associado a isso, tem-se, em Juiz de Fora, a prática regular da pesagem dos resíduos. Contribuindo de forma direta para a avaliação do comportamento do gerador e auxilia na tomada de melhores decisões.

A aplicação da Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custo de Manejo para RSU, permitiu a elaboração de fluxos de massas importantes e que convergem com o que sugere as normas regulamentadoras. Fortalecendo a tese de que o descarte dos resíduos em sua totalidade, quando feitos em aterros sanitários, mesmo que se apresente como uma tecnologia ambientalmente adequada, contradiz metas nacionais de redução de volume e recuperação energética.

Os cenários idealizados pelo Planares se apresentam como uma alternativa promissora para a gestão de resíduos sólidos domésticos, especialmente em cidades com desafios crescentes de disposição em aterros sanitários. Ao reduzirem significativamente o volume de resíduos e gerarem energia renovável, essas tecnologias se destacam pelo seu potencial ambiental e econômico, além de facilitar que a hierarquia preconizada se torne realidade.

Esse fato pode ser identificado pelos valores de redução, uma vez que foi alcançado todas as metas do PLANARES, recuperando 74,45% de todos os resíduos sólidos que seriam destinados ao aterro sanitário. Além disso, foi recuperado 24% dos resíduos por meio da reciclagem, ultrapassando em 4 pontos percentuais a meta estipulada. Também foi possível atingir 26,13% para recuperação de resíduos por meio de tratamento biológico, praticamente dobrando a meta de 13,5%. Por fim, a destinação de 14,6% como meta para tratamentos térmicos, que se apresentou em 32,65% ao utilizar diversidade de tratamentos.

No entanto, destaca-se a importância de aplicar novas estratégias de gerenciamento, flexibilizando um sistema mais eficiente. Destacar a separação na fonte, facilitar processos de triagem e implementar tecnologias de tratamento biológicos e térmicos, significa investir diretamente em infraestrutura municipal e um esforço para engajamento de todos os setores da sociedade. Promover conscientização, mudança de hábitos e comportamentos em relação aos resíduos sólidos, e compreender que esses estímulos podem partir também das indústrias geradoras.

Reforça também, o fato de que os aterros sanitários são o modelo de tratamento mais amplamente estimulado pelo município. Considerando a diversidade de tratamentos apresentados, é preciso se atentar para que outro tratamento não ocupe esse espaço monopolizado.

De tal modo, é possível concluir a possibilidade realista de novas alternativas eficientes para a destinação dos resíduos sólidos do município de Juiz de Fora.

REFERÊNCIAS

- ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Seção São Paulo (ABES-SP). **Cartilha de melhores práticas para a prevenção do COVID-19 no manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU)**. Disponível em <https://www.defensoria.sp.def.br/dpesp/Repositorio/31/Documentos/Cartilha%20de%20melhores%20praticas%20para%20a%20prevencao%20do%20COVID%2019%20no%20manejo%20dos%20residuos%20s0lidos%20urbanos%20> Acesso 07 de junho 2024.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2010). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. Grappa Marketing Editorial. Dezembro de 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório de 2020. Brasília: ANA, 2020.
- ANTENOR, Samuel; SZIGETHY, Leonardo. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. 2021. 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 10 de julho de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16001: responsabilidade social: sistema de gestão: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17100-1: gerenciamento de resíduos: Parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. [São Paulo]: ABREMA, 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 21 set. 2024.

Banco Mundial (2018). **What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management**.

BELLINI, Marta, MUCELIN, Carlos Alberto. **Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano**. Editora da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. **Bioresource Technology**, [Oxford, UK], v. 100, n. 22, p. 5444-5453, Nov. 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408009917>. Acesso em: 28 set. 2024

BRAGA, L. A.; SILVA, J. P.; ALMEIDA, R. R. **Operação de aterros sanitários no Brasil: desafios e perspectivas**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 1, p. 45-58, 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 306, de 7 de dezembro de 2004. **Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 49-50, 10 dez. 2004. Disponível em:

https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2004/res0306_07_12_2004.html. Acesso em: 28 set. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023**. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF: Presidência da República, 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11413.htm. Acesso em: 28 de setembro de 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico temático: manejo de resíduos sólidos urbanos: visão geral: ano de referência: 2022.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/vigilancia-de-doencas-cronicas-nao-transmissiveis/sistemas-de-informacao-em-saude>. Acesso em 10 de maio de 2024.

BRASIL. **Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2024]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 29 de julho de 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 8 maio 2024.

BRASIL. Lei nº14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 29 de setembro de 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. 54% dos municípios têm plano de resíduos sólidos. Portal Gov.br, Brasília, DF, 18 out. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/54-dos-municipios-tem-plano-de-residuos#:~:text=A%20pesquisa%20apontou%20que%20pouco,Plano%20Integrado%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos>. Acesso em: 06 de junho de 2024

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Roteiro para encerramento de lixões:** apoio para tomada de decisões. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento

Regional, 2021. Disponível em:

<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-ainformacao/acoes-e-programas/saneamento/proteger/06.RoteiroparaEncerramentodeLixoes.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

Disponível em:

https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-eprogramas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/agendaambientalurbana/lixozeroplano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 20 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos: 2019**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 10 maio 2024.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. **Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos - Visão Geral**. Setor de Autarquias. Brasília - DF, 2022.

Disponível em:

https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Snis/RESIDUOS_SO_LIDOS/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2023_ATUALIZADO.pdf Acesso em: 11 de agosto de 2024.

CAIXETA, D. M. **GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA INCINERAÇÃO DE LIXO URBANO: O CASO DE CAMPO GRANDE/MS**. 2005. 86 f. Monografia de Especialização (Pós Graduação Lato Sensu em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável). Centro de Desenvolvimento Sustentável - Universidade de Brasília, Brasília.

CIBIOGÁS. **BiogásMap: Panoroma do Biogás 2022**. 2022 Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDZiYTYyNGQyZiYzYS00NTMyLTk1Y2EtOWZm>

[ZjE4OTgwY2VklwiwCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9](#). Acesso em : 28 de setembro de 2024.

CEARÁ. **Lei Estadual n.º 16.032, de 23 de junho de 2016**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará. Disponível em:

<https://mpce.mp.br/wp-content/uploads/2015/12/Lei-Estadual-n%C2%BA16.032-2016-Institu-e-a-Pol%C3%ADtica-Estadual-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-no-Estado-do-Cear%C3%A1.pdf>. Acesso em: 29 set. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão da Diretoria n.º 072/2020/I, 31 de julho de 2020**. Dispõe sobre os requisitos para o licenciamento ambiental de sistemas de tratamento térmico sem combustão de resíduos de serviços de saúde contaminados biologicamente durante o estado de calamidade pública e dá outras providências. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2020/08/DD-072-2020-I-Requisitos-para-o-licenciamento-ambiental-de-Sistemas-de-Tratamento-de-Res%C3%ADduos-de-Servi%C3%A7os-de-Sa%C3%BAde.pdf>. Acesso em: 02 de agosto de 2024

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução n.º 316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Diário Oficial da União: seção 1.

Brasília, DF, ano 139, n. 224, p. 92-95, 20 nov. 2002. Disponível:

<https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-316-02-Tratamento-T%C3%A9rmico-de-Res%C3%ADduos.pdf> Acesso em: 2 de agosto de 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Meio Ambiente e Saneamento**. Coleta seletiva já faz parte da vida de 29% dos brasileiros. 2012. Disponível em:

<https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/coleta-seletiva-j%C3%A1-faz-parte-do-cotidiano-de-29-dos-brasileiros> Acesso em: 5 de junho de 2024

COSTA, M. F.; MARTINS, S. M. **Incineração de resíduos sólidos urbanos: uma análise crítica**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 44, n. 2, p. 123-134, 2017.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT, S. D. An integrated approach to municipal solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, [Amsterdam], v. 24, n. 1, p. 33-50, Oct. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S09213449\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S09213449(98)00031-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344998000317>. Acesso em: 28 set. 2024

DUARTE, P. A.; SCHOENELL, E. K. Encerramento de lixão e aterro controlado: orientações e alertas. Brasília, DF: Confederação Nacional de Municípios [CNM], 2024. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2024/Livros/202403_LIV_SANEA_Cartilha_Encerramento_Lixoes.pdf. Acesso em: 27 de setembro de 2024.

DUCHARME, C. B.; KIM, J. S.; CHOI, Y. S. Gasification of municipal solid waste for electricity generation in Korea. *Economic and Environmental Assessment*. 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (Estados Unidos). **Basic Information about Landfill Gas. 2024**. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas> Acesso em 06 de junho de 2024.

EPSTEIN, E. **Industrial composting: environmental engineering and facilities management**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.

EUROSTAT. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. **Eurostat**, Luxembourg, 7 ago. 2024. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en&category=env.env_was.env_wasgt. Acesso em: 31 de agosto de 2024

FRANCO, T. F. **Estudo preliminar de tecnologias térmicas avançadas no tratamento de resíduos perigosos, no estado do Rio de Janeiro**. 2016. 54 f. Tese (Pós Graduação em Gestão Ambiental). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Nilópolis

FRATTA, K, D, S, A.; TONELI, J, T, C, L.; MARANA, K, B, B. ANTONIO, G, C.; Revisão Sistemática da situação de gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil, visando o seu aproveitamento energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 10., 2019, Fortaleza. Anais... Bauru: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento [IBEAS], 2024. Disponível em:

<https://www.ibeas.org.br/congresso/congresso10.htm>. Acesso em: 28 setembro de 2024.

GALVANI, N. Entidades fazem ato público contra a incineração de lixo em Minas Gerais. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 21 jul. 2021. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2021/07/21/interna_gerais,1288657/entidades-fazemato-publico-contr-a-incineracao-de-lixo-em-minas-gerais.shtml. Acesso em: 17 set.

2024. Disponível em:

https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2021/07/21/interna_gerais,1288657/entidades-fazem-ato-publico-contr-a-incineracao-de-lixo-em-minas-gerais.shtml. Acesso em: 17 de setembro de 2024.

HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.

IBGE. **Censo Demográfico 2022**: características dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3106/cd_2022_domicilios.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Brasil). Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos vão para reciclagem. **Ipea**, Brasília, DF, 25 jan. 2021. Disponível em :

<https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/2841-apenas-13-dos-residuos-solidos-urbanos-vao-para-reciclagem>. Acesso em 09 de junho de 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2020**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2020. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/>

09/Relatorio_Ranking_Trata_Brasil_2020_Julho_.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Sistema de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: Alternativas tecnológicas**. Guarujá: IPT, 2017. Disponível em: <https://escriba.ipt.br/pdf/174800.pdf>. Acesso em: 28 set. 2024

Juiz de Fora (MG). Decreto N.º 14.568, de 31 de maio de 2021. **Dispõe sobre o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Juiz de Fora (PMGIRS/JF) e institui o Grupo de Trabalho Interinstitucional de Acompanhamento da sua Implementação e dá outras providências**. Juiz de Fora: Prefeitura de Juiz de Fora, 2021.

JUIZ DE FORA. Lei nº 82, de 03 de julho de 2018. **Dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e Territorial, o Sistema Municipal de Planejamento do Território e a revisão do PDP/JF de Juiz de Fora**. Diário Oficial do município de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 03 jul. 2018. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-juiz-de-fora-mg>. Acesso em: 28 de setembro de 2024.

JUIZ DE FORA. Lei nº 5.517, de 28 de novembro de 1978. **Cria o Departamento Municipal de Limpeza Urbana e dá outras providências**. Diário Oficial do município de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 28 de novembro de 1978. Disponível em: <https://jflegis.pjf.mg.gov.br/norma.php?chave=0000016424>. Acesso em 22 de setembro de 2024.

MATO GROSSO. **Lei n.º 3.367, de 21 de dezembro de 2007**. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Disponível em: <http://aacpdappls.net.ms.gov.br/appls/legislacao/secoge/govato.nsf/448b683bce4ca84704256c0b00651e9d/74f59daec101577b042572ba004bcb6a?OpenDocument&Highlight=2,3,367>. Acesso em: 29 set. 2024.

MENDONÇA, F. L. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e**

ambientais. 2018. 27 f. Tese (Graduação em Engenharia Ambiental). Faculdade de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 48.107, de 29 de dezembro de 2020.** Altera o Decreto nº 45.181, de 25 de setembro de 2009, que regulamenta a Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2020. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/48107/2020/>. Acesso em: 17 de setembro de 2024.

MINAS GERAIS. **Lei nº 21.557, de 22 de dezembro de 2014.** Acrescenta dispositivos à Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009 – que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos –, com o objetivo de proibir a utilização da tecnologia de incineração nos casos que especifica. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/21557/2014/>. Acesso em: 31 de agosto de 2024

MIRANDA, L. F. R.; SILVA, M. C. **Reutilização de resíduos da construção civil em pavimentação.** Revista de Engenharia Civil, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2018.

MOREIRA, T. A.; NETO, P. N. **Consórcio intermunicipal como instrumento de gestão de resíduos sólidos urbanos em regiões metropolitanas: reflexões teórico-conceituais.** Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional. Taubaté, v. 8, n. 3, p. 239-282, fevereiro de 2012.

Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (Brasil). **Demanda do Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis ao Governo Federal.** São Paulo: ANCAT: MNCR: Unicatadores, 2023. Disponível em: <https://www.mnrc.org.br/noticias/demandas-domnrc2023.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024

OLIVEIRA, Allan Luís Augusto Redes de. **Avaliação do ciclo de vida aplicada na gestão dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso do Distrito Federal.** Orientador: Prof. Dr.

Armando de Azevedo Caldeira Pires. 2019. 96 f. Dissertação (Mestre em Ciências Mecânicas) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

OLIVEIRA, R. C.; SANTOS, A. P.; PEREIRA, M. C. **Desafios na implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos nos municípios brasileiros**. Revista de Gestão Ambiental, v. 11, n. 2, p. 20-34, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Suécia: pioneira em boas práticas na gestão de químicos e resíduos. UNEP, Nairóbi, 24 jun. 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/story/suecia-pioneira-em-boas-praticas-na-gestao-de-quimicos-e-residuos>. Acesso em: 20 de setembro de 2024.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Relatório de Gestão de Resíduos Sólidos**. Juiz de Fora, 2010.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Clima de Juiz de Fora**. Juiz de Fora: Prefeitura de Juiz de Fora, c2021. Disponível em: <http://www.pjf.mg.gov.br/cidade/clima.php>. Acesso em: 27 set. 2024.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. Juiz de Fora passa a integrar Programa Internacional sobre Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=84244>. Acesso em: 29 set. 2024.

PAULA, A. S.; REICHERT, G. A. **Ferramenta rotas e custos: gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: manual do usuário**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/ferramenta-derotas-tecnicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/01>. [ManualdaFerramentaRotaseCustos_jun.2021.pdf](#). Acesso em: 20 set. 2024.

PAULA, A. S.; REICHERT, G. A. **Ferramenta de rotas tecnológicas e custos para manejo de RSU: ProteGEEr**, versão 1.01. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional,

maio 2022. Disponível em:

https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/proteger/ferramentade-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/FerramentaRotaseCustosV.1.01_Mai.2022.xlsm. Acesso em: 20 set. 2024.

Ramos, A. I. M. C. **Experimental study of the operating conditions impact on fuel blends co-gasification: environmental and socio-economic assessment**. 2020. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) - Faculty of Engineering, University of Porto

RECICLAGEM em números. São Paulo: Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis [ANCAT], c2024. Disponível em:

<https://atlasbrasileirodareciclagem.ancat.org.br/reciclagem-em-numeros#:~:text=24%25%20dos%2Fas%20catadores%2F,for%C3%A7a%20de%20trabalho%20no%20Brasil>. Acesso em 10 de maio de 2024.

REVIVA AMBIENTAL. **Digestão aeróbia: processo, funcionamento e vantagens**.

Reviva Ambiental, 2024. Disponível em:

<https://revivaambiental.com/2024/07/01/digestao-aerobia-processo-funcionamento-e-vantagens/>. Acesso em: 29 set. 2024.

RODRIGUES, Eduardo B.; GONÇALVES, Raul A.; SANTOS, Maria C. Observações sobre o consumo energético em edifícios residenciais no Brasil. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. Disponível em:

<https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/480#:~:text=Observou%2Dse%20que%20o%20consumo,3%20kWh%2Fm%C3%AAs%20no%20inverno>. Acesso em: 29 set. 2024.

SANTOS, R. S.; LIMA, M. E.; COSTA, H. M. **Compostagem de resíduos orgânicos: desafios e oportunidades no Brasil**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 52, n. 1, p. 45-57, 2019.

SAWATDEENARUNAT, C. et al. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, [Oxford, UK], v. 178, p. 178-186, Feb. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414013625>. Acesso em: 28 set. 2024.

SILVA, C. S. S.; BOLL, N.; ZANIN, G. B.; PERETTI, G.; SOUZA, D. S. **Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, v. 16, n. 4, p. 123-135, 2022.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE JUIZ DE FORA. **Relatório Anual de Gestão Ambiental**. Juiz de Fora, 2015.

SILVA, J. P.; MENDONÇA, R. A.; ALMEIDA, M. M. **Triagem de resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso**. Revista de Gestão Ambiental, v. 12, n. 3, p. 123-134, 2018.

SOUZA, C. C; Japão já recupera 74% da energia do seu lixo e nos EUA, 12%. **Agrolink**, [São Paulo], 10 de junho de 2021. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/japao-ja-recupera-74--da-energia-do-seu-lixo-e-nos-eua--12-451421.html>. Acesso em: 21 de setembro de 2024.

SZIGETHY, L.; ANTENOR, S.; Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. **Instituto de Pesquisa econômica Aplicada (IPEA)**, Brasília, DF, 09 de julho de 2020. 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 27 de setembro de 2024.

WHITE, P. R.; FRANKE, M.; HINDLE, P. **Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory**. London: Blackie Academic & Professional, 1995.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Human Leptospirose: guidance for diagnosis, surveillance and control.** 2003. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/human-leptospirosis-guidance-for-diagnosis-surveillance-and-control>. Acesso em 06 de junho de 2024.

ZHANG, L.; SUN, X. Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. **Waste Management**, [Nova York], v. 48, p. 115-126, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15302166>. Acesso em: 28 set. 2024.

