



TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E SUAS CARACTERÍSTICAS SOCIOAMBIENTAIS

Vinício de Barros Heleno¹, Jonathas Batista Gonçalves Silva²

Mestrando no Programa de pós graduação de Ambiente Construído- Depto de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora.

vinicio.heleno@engenharia.ufjf.br

Doutor em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Juiz de Fora.

jonathas.silva@engenharia.ufjf.br

Recebido em: 15/06/2022 – Aprovado em: 15/07/2022 – Publicado em: 30/07/2022

DOI: 10.18677/Agrarian_Academy_2022A6

trabalho licenciado sob licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

RESUMO

A partir da II Revolução Industrial, a geração de lixo e substâncias tóxicas ao ambiente tomaram uma proporção desenfreada, acometendo principalmente os centros urbanos onde as fábricas se localizavam. Esse processo de urbanização, provocado e acentuado pelas novas demandas de mercado decorrentes da revolução, gerou uma piora na qualidade de vida daqueles que viviam nas cidades. Ao longo dos anos, a população começou a cobrar mais efetivamente seus direitos e assim novas leis e políticas começaram a surgir. Políticas nacionais como a Política Nacional de Saneamento Básico e a Política Nacional de Resíduos Sólidos auxiliaram nos processos de limpeza das cidades através de melhorias das vias públicas e da qualidade de vida da comunidade, além de darem um destino correto aos resíduos sólidos urbanos. Várias são as formas de destinação dos resíduos sólidos, entre as mais comuns estão os aterros e os lixões. Mas se a deposição e o tratamento dos resíduos forem feitos de forma incorreta a saúde do ambiente e da população são colocadas em risco. Para amenizar os impactos causados pelo acúmulo desenfreado de lixo nessas áreas, existem alternativas de tratamento adequado para cada tipo de resíduo gerado, dentre elas estão: coleta seletiva, compostagem e o tratamento térmico, o qual ainda é capaz de gerar energia renovável. Dessa forma, o objetivo desta revisão é apresentar essas alternativas de tratamento e manejo dos resíduos sólidos urbanos e suas características socioambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Coleta seletiva, Compostagem, Incineração.

SOLID URBAN WASTE TRATAMENT TECHNIQUES AND THEIR SOCIO-ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

ABSTRACT

From the II Industrial Revolution, the generation of garbage and toxic substances to the environment took an unbridled proportion, affecting mainly the urban centers where the factories were located. This urbanization process, provoked and accentuated by the new market demands resulting from the revolution, generated a worsening in the quality of life of those who lived in the cities. Over the years, the population began to demand their rights more effectively and so new laws and policies began to emerge. National policies such as the National Basic Sanitation Policy and the National Solid Waste Policy have helped in the processes of cleaning cities by improving public roads and the quality of life of the community, in addition to giving a correct destination to urban solid waste. There are several ways to dispose of solid waste, among the most common are landfills and dumps. But if the disposal and treatment of waste is done incorrectly, the health of the environment and the population are put at risk. To mitigate the impacts caused by the rampant accumulation of garbage in these areas, there are suitable treatment alternatives for each type of waste generated, among them are: selective collection, composting and thermal treatment, which is still capable of generating renewable energy. Thus, the objective of this review is to present these alternatives for the treatment and management of urban solid waste and their socio-environmental characteristics.

KEYWORDS: Biogas, selective collection, composting, incineration

INTRODUÇÃO

Resíduos sólidos urbanos (RSU) são todos os tipos de resíduos oriundos dos domicílios, da limpeza urbana de vias públicas e de outros serviços destinados à limpeza dessas áreas. Grande parte desses resíduos são, eventualmente, descartados de forma inadequada em aterros sanitários ou controlados e em lixões (PACHECO; SANTOS, 2022).

Os aterros sanitários são definidos como uma técnica utilizada para depositar os RSU no solo, utilizando a menor área possível para assim reduzi-los ao menor volume cabível, cobrindo-os posteriormente com uma camada de terra. Existem também as áreas de aterro controlado, que são áreas com um menor grau de rigorosidade, quando comparados com os aterros sanitários, porém com certo controle operacional e ambiental para garantir a promoção da execução adequada do descarte dos RSU (PACHECO; SANTOS, 2022).

Estes mesmos autores ainda relatam que os lixões são aquelas áreas onde não há nenhum tipo de controle sobre a destinação, descarte, qualidade e quantidade dos resíduos, colaborando assim para o desgaste e contaminação do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas, por meio da liberação dos gases, líquidos e compostos lixiviadores e contaminantes produzidos a partir da deterioração dos RSU. Ainda, os lixões provocam depreciação visual do ambiente e pioram a qualidade de vida dos moradores que vivem no entorno, se tornando um possível problema de saúde pública para esses indivíduos, além de aumentarem os gastos públicos com prevenção e tratamento das doenças oriundas do contato com os resíduos e seus produtos tóxicos (LEITE *et al.*, 2019).

Dados divulgados pela publicação do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil no ano de 2020, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de

Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE,2020), apontam o aumento de 12,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos entre os anos de 2010 e 2019. Esses dados se relacionam com a quantidade de lixo produzido por cada brasileiro, correspondendo a mais de 1 kg/dia (em média 379,2 kg/ano para cada pessoa), sendo a maior parte destinada aos aterros sanitários.

Por outro lado, a quantidade de resíduos que segue para áreas inadequadas também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas por ano para pouco mais 29 milhões de toneladas (ABRELPE, 2020). Veras e Farias (2019) enfatizam os prejuízos provenientes da deposição inadequada dos RSU, trazendo malefícios à saúde pública e ambiental, além de deteriorar a paisagem, a mobilidade urbana, dentre outros. Ademais, essas áreas contribuem para o esgotamento dos aterros sanitários e de recursos naturais, obstruem os sistemas de drenagem urbana e inviabilizam a utilização correta dos materiais recicláveis, trazendo assim inúmeras consequências aos municípios.

Em vista da regulamentação da deposição dos RSU, foi criada a Lei nº 12.305 de 2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual dispõe sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos, com exceção dos dejetos radioativos, às responsabilidades dos seus geradores e do poder público, e aos instrumentos econômicos aplicáveis à sua gestão (BRASIL, 2010). Essa lei instituiu uma logística por trás da gestão dos RSU, a qual se inicia pela possibilidade de não geração desses resíduos; elaboração de métodos para a redução, reutilização, reciclagem e tratamento; e se ainda assim não for possível conter a produção, dispõe sobre formas ambientalmente adequadas para os rejeitos que não possuem nenhuma utilidade possível (LEITE *et al.*, 2019).

Além da lei acima citada, ainda existe a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) que foi criada através da Lei nº 11.445 de 2007. Nesta ocorre a integração da gestão dos resíduos sólidos aos planos municipais de saneamento básico por meio de articulações políticas de desenvolvimento urbano, de habitação, de combate à pobreza, proteção ambiental, promoção à saúde em conjunto com a Lei nº 8.080 de 1990, e outras ações voltadas para a melhoria da qualidade de vida da população onde o saneamento básico for fator determinante (BRASIL, 2007; SANTOS *et al.*, 2018).

Dessa forma, os serviços de saneamento básico englobam o abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, manejo de águas pluviais e o gerenciamento de resíduos sólidos. Este último merece a devida atenção dada por esse trabalho visto que, apenas em 2016, foram produzidos e destinados aos lixões cerca de dois bilhões de toneladas de resíduos mundialmente, totalizando assim uma quantidade acima da realidade almejada pelas políticas públicas destinadas à gestão desses resíduos (AGUIAR *et al.*, 2021).

Ainda é necessário o aperfeiçoamento das diversas técnicas de manejo e tratamento dos RSU, além de garantir as suas aplicações de acordo com as realidades dos municípios brasileiros, fazendo com que os impactos causados pelas milhares de toneladas de resíduos despejados pelos municípios e pela população em geral sejam reduzidos (LEITE *et al.*, 2019). Assim, o presente estudo tem por objetivo revisar, dentro da literatura atual, algumas das técnicas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos utilizadas e suas características socioambientais.

RESÍDUOS SÓLIDOS

Com o exponencial crescimento populacional em todo o mundo, a geração de lixo também aumentou. Esse aumento implica na necessidade de criação e inovação com relação à gestão dos resíduos sólidos urbanos. Um instrumento bastante utilizado no gerenciamento de RSU é o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), o qual foi criado mediante a Lei nº 12.305 de 2010. Esse plano propõe alguns modelos de gerenciamento de acordo com a realidade de cada município, contando ainda com a participação da comunidade que utiliza os serviços públicos de limpeza, propiciando alguns instrumentos de gestão integrada dos resíduos sólidos no município (BRASIL, 2010). Entretanto, grande parte dos municípios brasileiros ainda apresentam técnicas de manejo de RSU inadequadas à realidade local e à legislação vigente (SILVA *et al.*, 2021.) Uma das diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos se baseia em diferentes tipos de tratamento para cada tipo de resíduo gerado antes que este seja depositado em áreas adequadas. Esses tratamentos alternativos podem gerar inúmeros benefícios a longo prazo, como por exemplo a garantia de reciclagem dos materiais, a geração de novos empregos e a diminuição do impacto ambiental causado pela deposição inadequada (PRATES *et al.*, 2019).

Segundo Souza (2018), é necessário que ocorra uma diminuição do despejo dos RSU em aterros ou áreas similares. Dessa forma, o investimento do governo e de empresas privadas em técnicas de separação entre os tipos de materiais (recicláveis, rejeitos e orgânicos) se faz fundamental para a mudança do cenário atual, essas técnicas estão classificadas dentro do tipo de tratamento denominado mecânico. A parte orgânica dos RSU possui tratamento específico de reaproveitamento através de métodos biológicos, que tornam possível a produção de energia renovável e de compostos orgânicos, que recebem os respectivos nomes de digestão anaeróbica (DA) e compostagem. Outra forma de manejo dos RSU é o tratamento térmico, que embora bastante controverso, ainda é regulamentado pelos sistemas de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos (CARDOZO *et al.*, 2021).

Política Nacional de Saneamento Básico

O saneamento básico é definido como um conjunto de ações que promovem e garantem à sociedade condições básicas de bem-estar, saúde e segurança, constituindo assim um direito do cidadão brasileiro. Essas ações compreendem, por exemplo, sistemas de coleta e tratamento do esgoto; abastecimento e tratamento de água potável; coleta e disposição adequadas dos RSU; e controle dos níveis de poluição do ar e das águas. Tais medidas são vistas, pela Política Nacional de Saneamento Básico e pelas Leis Orgânicas de Saúde, como medidas de prevenção no âmbito da saúde pública, promovendo a economia de recursos financeiros com gastos voltados para a cura e tratamento de doenças e agravos à saúde (SANTOS *et al.*, 2018).

Mesmo após a implantação da PNSB, no Brasil ainda há deficiência considerável em relação à garantia desses serviços para toda a população, afetando a porção mais carente da sociedade. Dessa forma, a qualidade de vida daqueles que não usufruem da realidade do fornecimento de saneamento básico é prejudicada, e o governo tem que abrir mão de recursos financeiros para amenizar os problemas decorrentes da ineficiência de implantação adequada e da má gestão das políticas públicas (SANTOS *et al.*, 2018).

Enfatizando os problemas relacionados ao acesso prejudicado da população aos seus direitos previstos na PNSB, dados apontam que 93% da população que vive nos centros urbanos tem acesso à água tratada, ao passo que apenas 60,2% usufruem dos serviços de coleta de esgoto. Desses, somente 46% do esgoto coletado passa por processos de tratamento. Esse fato converge para a temática da necessidade de melhor gerenciamento referente a aplicação das diversas políticas públicas voltadas à melhora da qualidade de vida da população (VALENTE, 2019).

Política Nacional de Resíduos Sólidos

A PNRS, regulamentada pelo decreto nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010, dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Além de abordar a definição do que é considerado gestão integrada dos resíduos sólidos, a qual se caracteriza como um conjunto de ações que visam solucionar as problemáticas acerca dessa temática no País levando em consideração as dimensões econômicas, socioambientais, culturais e políticas. Essa política também faz menção à participação ativa da sociedade como parte fundamental para a funcionalidade adequada das operações, garantindo um melhor desenvolvimento sustentável. Dessa forma, se faz necessário a integralização dos setores citados acima por meio de outras políticas para assim amenizar os inúmeros impactos causados pela gestão inadequada dos RSU, como a Política Nacional de Meio Ambiente, Política Nacional de Educação Ambiental e a Política Nacional de Saneamento Básico (LAVNITCKI *et al.*, 2018; MAIELLO *et al.*, 2018).

A PNRS também propõe a erradicação dos lixões e demais locais utilizados para deposição inadequada dos resíduos sólidos, além de incentivar a prática da reciclagem, reutilização e a implantação de inovações tecnológicas sustentáveis. Ainda, institui o Plano de Resíduos Sólidos que aborda alternativas de gestão para os diversos tipos de resíduos, as quais contribuem para o desenvolvimento econômico sustentável das cidades (LAVNITCKI *et al.*, 2018).

Com a implementação da PNRS, através da Lei nº 12.305 de 2010, muitos municípios ainda se encontram deficitários em sua aplicação devido à ineficiência das entidades, públicas e privadas, responsáveis pela gestão dos processos que envolvem manejo e tratamento dos resíduos sólidos. Essa ineficiência acerca da aplicação adequada das políticas públicas se traduz em diversos impactos ambientais e na própria sociedade na forma de: poluição do solo através da produção do chorume que ocorre nos locais em que os RSU são dispostos e tratados de forma inadequada, afetando assim os lençóis freáticos; poluição do ar por meio da liberação de partículas poluidoras (como o metano, que contribui para o efeito estufa e o aquecimento global) produzidas durante a digestão anaeróbica da matéria orgânica; e piora da qualidade de vida da população, constituindo um agravante para a saúde pública e aumentando os gastos do governo com uma pauta que poderia ser prevenida se houvesse manejo adequado dos RSU (MAIELLO *et al.*, 2018).

Tratamento mecânico e biológico dos resíduos sólidos urbanos

O tratamento mecânico é baseado no processo de separação dos diferentes tipos de materiais que são encontrados nos RSU. Esse processo não envolve nenhuma reação química entre os resíduos sólidos, e após a separação cada tipo de matéria é destinada para o melhor manejo indicado. Os materiais orgânicos seguem para o tratamento biológico, no qual ocorrem ações de microrganismos digestores de matéria orgânica (SOUZA, 2018).

A digestão anaeróbica (DA) é o nome dado ao processo realizado pelas bactérias, na ausência de oxigênio, em biodigestores. Essas bactérias possuem o papel de produzir dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e digestato, o qual pode ser definido como o produto final da digestão anaeróbica que possui alto potencial fertilizante. Durante o processo de DA ocorre a hidrólise da fração orgânica dos RSU, e após essa etapa as moléculas de glicose, aminoácidos e ácidos graxos são convertidos em CO_2 , amônia, hidrogênio, álcoois e outros ácidos orgânicos (SOUZA, 2018).

Posteriormente, há o processo de produção de ácido acético, dióxido de carbono e amônia. Esses compostos convergem então para a etapa final de metanogênese, onde é produzido o biogás que é resultado da mistura entre metano e dióxido de carbono e outros gases em menores proporções (SILVA *et al.*, 2020). A Figura 1 demonstra um pátio de biodigestores de matéria orgânica.

FIGURA 1 – Biodigestores



Fonte: Disponível em:

<<https://epocanegocios.globo.com/Empresa/noticia/2016/09/menor-termoeletrica-com-combustivel-renovavel-e-inaugurada-em-sao-paulo.html>>.

Assim, como alternativa aos impactos ambientais causados pela produção do gás metano, o biogás serve como uma alternativa com grande potencial de utilização para a geração de energia renovável e, como consequência, redução da emissão de CO_2 e CH_4 . A redução na emissão desses gases contribuintes do aquecimento global gera créditos de carbono para os países, os quais podem ser comercializados e com isso geram renda extra, a qual pode vir a representar uma parcela da receita destinada aos aterros sanitários como forma de incentivo para o tratamento mecânico-biológico dos resíduos sólidos. O Brasil é um país que recebe bastante destaque com relação a utilização de ferramentas do Protocolo de Quioto, como por exemplo o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (FREITAS *et al.*, 2019).

O MDL é uma estratégia criada com o objetivo de oferecer vantagens aos vendedores e compradores de créditos de carbono, contribuindo assim para o incentivo e fortalecimento do desenvolvimento sustentável para os países emergentes (FERNANDES; LEITE, 2021). Contudo, o Brasil ainda apresenta baixa adesão do aproveitamento dos créditos de carbono e do potencial energético dos

produtos derivados dos RSU, constituindo assim um cenário desfavorável para o crescimento econômico do País e para o seu ecossistema (FREITAS *et al.*, 2019).

Compostagem

Diferente da digestão anaeróbica, a compostagem é um processo que envolve microrganismos aeróbicos que possuem o papel de decompor a matéria orgânica presente nos RSU na presença de oxigênio. A principal vantagem desse tipo de tratamento é o custo-benefício, pois possui baixo valor de implantação e operação sem deixar de lado a eficiência na redução da quantidade dos resíduos orgânicos. Esse processo pode ser classificado entre natural e acelerado. O método natural acontece por si só e de forma manual dentro de um período que compreende de três a quatro meses, contando apenas com a utilização de máquinas em alguns casos. Já no método acelerado, o processo aeróbico é forçado por meio de instrumentos que injetam oxigênio dentro das composteiras, e com isso o processo chega ao fim em um período de dois a três meses. O produto final da compostagem é um composto estabilizado rico em nutrientes que pode ser utilizado na produção agrícola como fertilizante, e sua qualidade irá depender dos resíduos utilizados para a produção (PRATES *et al.*, 2019). A Figura 2 mostra um exemplo dos métodos de compostagem natural (à esquerda) e acelerada (à direita).

FIGURA 2 – Métodos de compostagem natural e acelerada.



Fonte: Disponível em:

<<https://www.condominiosverdes.com.br/centrais-publicas-de-compostagem/>>

e

<<https://www.andradeengenharia.com.br/composteira-shopping-maia/>>.

De acordo com Melo e Duarte (2018), esse método é um dos mais úteis ao ecossistema pois proporciona um destino sustentável aos resíduos, evitando o acúmulo nos solos e ainda melhorando a qualidade. Além disso, a compostagem é capaz de amenizar os impactos sociais, ambientais e econômicos, e ainda implica em redução dos gastos com a gestão dos diferentes tipos de aterros e outras técnicas que ocupam grandes áreas, as quais poderiam estar sendo utilizadas para outros fins. Dessa forma, a compostagem é uma das melhores técnicas de tratamento das matérias orgânicas derivadas dos RSU uma vez que é capaz de promover a redução do volume dos materiais despejados nos aterros e lixões, evitando assim a ocupação desnecessária e a proliferação de doenças entre os indivíduos que entram em contato com esse material.

Outra vantagem dessa técnica é a geração de renda que esta promove, fortalecendo a economia local. A sua aplicação também está de acordo com a logística instaurada pela PNRS de 2010, pois compreende desde a diminuição e não geração dos resíduos, até os processos de redução, reutilização e reciclagem dos RSU e seus produtos finais. Além disso, a diretriz referente a participação da comunidade está fortemente atribuída aos processos da compostagem, uma vez que é um método que pode ser facilmente aplicado dentro dos próprios domicílios (MELO; DUARTE, 2018).

Coleta seletiva

A Lei nº 12.305 de 2010 define a coleta seletiva como um processo de junção dos resíduos sólidos recicláveis que foram separados conforme sua composição e natureza através do tratamento mecânico. Essa técnica possui papel extremamente importante para a execução adequada da gestão integrada dos RSU uma vez que, teoricamente, o lixo é separado diretamente por quem o gerou. Contudo, para que isso ocorra, é necessária a promoção da educação ambiental baseada na não geração ou redução da geração de lixo pela sociedade, incentivando hábitos que diminuam o consumo e o desperdício. A coleta seletiva também é útil para a geração de emprego e renda para as famílias brasileiras, auxiliando também na melhoria da qualidade de vida da população, além de melhorar a qualidade da matéria orgânica voltada para os processos de compostagem (MIRANDAS; MATTOS, 2018).

Essa técnica pode ser classificada em diferentes métodos e modelos de operação, em que cada município pode se enquadrar de acordo com a sua realidade e necessidade. Assim, existem duas metodologias operacionais: Segregação total na fonte, a qual é realizada dentro dos lares brasileiros pelos próprios moradores; e a separação em locais de triagem, onde são necessários galpões disponibilizados pelo governo ou entidades (MIRANDAS; MATTOS, 2018).

Já os modelos de gerenciamento se dividem em três: 1) Coleta seletiva porta a porta, que é o modelo mais utilizado e se baseia na separação prévia dos materiais recicláveis realizada pela própria população com posterior recolha por veículos específicos para a destinação desses materiais aos locais adequados; 2) Coleta seletiva em Postos de Entrega Voluntária (PEV), onde os próprios moradores realizam a destinação correta dos materiais separados em metal, papel/papelão, madeira, vidro e plástico, além de resíduos ambulatoriais, resíduos perigosos, resíduos orgânicos e resíduos radioativos (cada um com suas respectivas cores de identificação); 3) Coleta seletiva por trabalhadores autônomos em vias públicas, estabelecimentos comerciais, indústrias e outros locais, podendo ter ou não a contribuição do poder público e outras organizações (MIRANDAS; MATTOS, 2018). A Figura 3 demonstra um exemplo de PEV.

FIGURA 3 – Postos de entrega voluntária (PEV)



Fonte: Disponível em:

<<https://www.diariodoplanalto.com.br/canoinhas-ter%C3%A1-pontos-de-entrega-volunt%C3%A1ria-de-material-recicl%C3%A1vel-1.2083715>>.

Segundo os mesmos autores acima, essa técnica de tratamento dos resíduos sólidos possui várias vantagens que implicam na melhoria da qualidade do ambiente. Dentre essas vantagens, pode-se citar a economia de algumas matérias-primas virgens renováveis e não renováveis que seriam utilizadas na produção de bens de consumo; economia de energia com o processo de reaproveitamento dos materiais recicláveis quando comparado com os processos utilizados para produção de bens por meio de matérias-primas virgens; redução da deposição de resíduos em lixões e aterros; e consequente redução dos impactos ambientais.

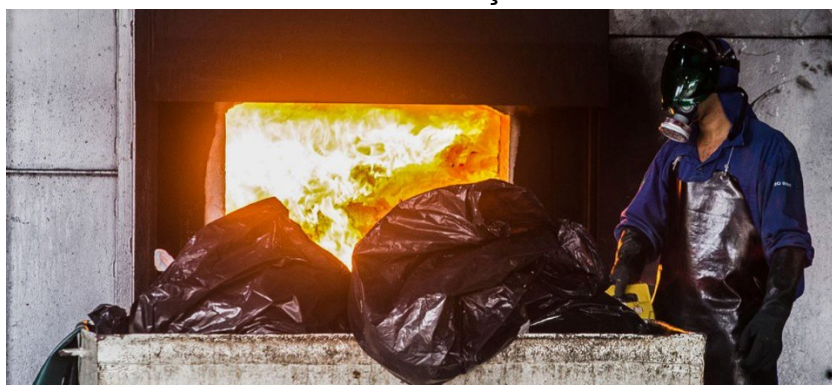
Mesmo com as inúmeras informações sobre as vantagens da aplicação da coleta seletiva e a praticidade, essa prática ainda é pouco explorada no Brasil devido a alguns fatores. Dentre estes estão o elevado custo com a logística da coleta e com os materiais necessários para a sua realização, a variação econômica no mercado de compra de materiais recicláveis, precariedade do funcionamento dos processos envolvidos nesse tipo de tratamento dos RSU, falta de incentivos fiscais voltados para as cooperativas, sucateiros, recicladores e pesquisadores, além da falta de treinamento para a mão de obra e de educação ambiental para a sociedade. Dessa forma, uma prática que poderia ser amplamente realizada pelos brasileiros e que traria inúmeras vantagens socioambientais, cai no esquecimento da população por falta de incentivo do poder público e de empresas privadas (MIRANDAS; MATTOS, 2018).

Tratamento térmico

A forma mais usual de tratamento térmico para os resíduos sólidos é a incineração dos materiais, pois é capaz de reduzir a massa e o volume dos RSU em 70% a 90%, respectivamente, nos aterros e lixões. Esse processo ocorre em estruturas fechadas onde há oxidação térmica dos carbonos presentes nos materiais selecionados, em temperaturas entre 600 e 1.100 °C, na presença de oxigênio. Dessa oxidação são retirados resíduos combustíveis e não combustíveis, além de cinzas (PESSOA FILHO, 2020).

O produto da incineração é potencialmente transformado em energia renovável e essa produção gera números satisfatórios uma vez que a maioria dos fornos utilizados para o processo recebem, em média, de 301 a 700 toneladas de resíduos por dia, sendo que alguns possuem capacidade de recebimento superior a mil toneladas por dia. Contudo, o método em questão possui grande participação na pauta dos impactos ambientais devido à produção de gases nocivos à saúde da população e do meio ambiente, como o óxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono, dentre outros. Mediante a isto, foi feito um estudo para avaliar a quantidade desses gases que são emitidos pelas usinas térmicas. Dessa forma, o resultado observado foi que os valores médios anuais de emissão desses gases são inferiores aos preconizados pelo limite legal em 40% (CARDOZO *et al.*, 2021). A Figura 4 demonstra uma estrutura onde ocorre a combustão dos RSU.

FIGURA 4 – Fornalha de incineração dos RSU.



Fonte: Disponível em:
<<https://www.resiclean.com.br/confira-detalhes-incineracao-residuos/>>.

O tratamento térmico é uma alternativa bastante rentável devido ao elevado potencial de geração energética através da conversão do poder calorífico dos materiais em energia, a qual auxilia na produção de vapor e aquecimento da água utilizada nas turbinas geradoras de energia elétrica renovável. Outra vantagem do processo de incineração é a economia de área utilizada para a realização do processo quando comparada com a área utilizada pelos aterros, fazendo com que seja possível a instalação dentro do perímetro do município, diminuindo os gastos com a manutenção de grandes áreas (PESSOA FILHO, 2020).

O método de incineração possui elevado custo-benefício pois para a sua realização são necessários equipamentos e filtros utilizados na etapa de contenção da fuligem e de gases tóxicos como o óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, dióxidos e furanos. Ademais, há a impossibilidade de utilização de materiais úmidos ou que possuam cloro em sua composição por prejudicarem o processo de queima e aumentarem a geração de substâncias tóxicas. Ainda são necessárias técnicas mais aperfeiçoadas que possibilitem um tratamento térmico mais eficiente dos RSU sem gerar tanto desgaste socioambiental (FERRARI; ANDRADE, 2021).

Potencial de geração de energia renovável através da utilização do biogás e da incineração dos resíduos sólidos urbanos

As formas de geração de energia usualmente utilizadas no Brasil trazem consigo impactos socioambientais consideráveis, e devido a isso, o poder público, entidades privadas e a própria comunidade científica incentivam o uso de fontes alternativas para a geração de energia, como por exemplo a utilização dos RSU (RIBEIRO; BORGES, 2021).

Às luzes da Política Nacional de Resíduos Sólidos e da Política Nacional de Saneamento Básico, foi instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) a partir da Lei nº 10.483 de 2002. Neste, há a ampliação dos incentivos para a geração de energia renovável a partir das alternativas que utilizam os resíduos sólidos. Esse programa incentiva a participação de produtores autônomos de biomassas e centrais hidroelétricas e eólicas de pequeno porte (DALMO *et al.*, 2018).

A utilização de fontes alternativas para a geração de energia elétrica contribui para melhorias das operações nos aterros e da gestão dos resíduos, gerando

créditos de carbono, os quais são vendidos a entidades públicas e privadas. Ademais, as energias alternativas possuem papel fundamental para a redução de gases tóxicos que prejudicam a qualidade do ar e da atmosfera como um todo por meio da produção de metano, que é um gás tóxico com odor desagradável e com capacidade de degradação da camada de ozônio (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

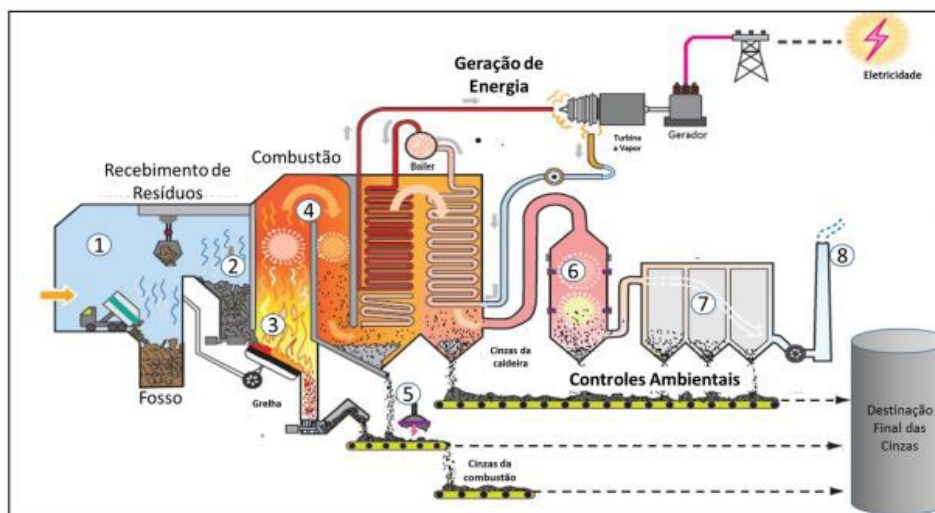
Mesmo com a implantação da Lei nº 12.305 de 2010 e dos incentivos por parte das políticas públicas, o gerenciamento dos RSU e a geração de energia como forma de utilização desses materiais ainda são bastante precários no País, quando se comparado com a quantidade de resíduos sólidos gerados pela população no geral. A utilização de energia renovável oriunda dos RSU compreende cerca de menos de 0,07% da participação nas matrizes geradoras de energia renovável (DALMO *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2019).

A publicação do panorama de geração de RSU divulgado pela ABRELPE (2021) demonstrou que, nos últimos dois anos, a quantidade de RSU produzida sofreu forte influência da pandemia de COVID-19, totalizando 82,5 milhões de toneladas de lixo, podendo compreender, em média, que cada brasileiro produziu 1,07 kg de resíduo/dia. A região sudeste contribuiu em 49,7% para o aumento dos RSU, seguida da região nordeste (24,7%) e sul (10,8%). Os RSU detêm grande parte da matéria orgânica descartada pela população, a qual possui potencial entre 50 e 60% para geração de energia elétrica por meio do aproveitamento do biogás (composto por 40 a 55% de metano). Mesmo com os benefícios já estudados e consolidados por pesquisas e pela literatura, apenas oito estados brasileiros realizam o aproveitamento na forma de energia elétrica (MENDONÇA; BORNIA, 2019).

Nesses estados foram implantadas, até o ano de 2015, nove usinas termelétricas que aproveitam o biogás produzido através dos RSU, as quais são capazes de gerar cerca de 86,3 MW de energia elétrica (DALMO *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2019). Um estudo realizado por Brondani *et al.* (2020) estimou que a quantidade de energia gerada em um aterro sanitário, com capacidade de recebimento de 500 toneladas de lixo/dia (totalizando uma média de 182.500 toneladas/ano), é de aproximadamente a 365 kWh.

A energia advinda do aproveitamento do biogás se traduz em uma alternativa bastante conveniente, tanto para a economia dos municípios, quanto para o desenvolvimento sustentável das cidades e do País, levando à diminuição dos impactos socioambientais causados pelo acúmulo de lixo nos aterros e lixões (DALMO *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2019). De acordo com Oliveira *et al.* (2018), uma tonelada de lixo depositado nos aterros e em áreas similares é capaz de contribuir para a produção de 1,3 toneladas de dióxido de carbono, potencializando o efeito estufa. Outro método utilizado para amenizar os prejuízos gerados pelo acúmulo exacerbado dos RSU é a combustão. A Figura 5 exemplifica o processo de produção de energia elétrica a partir da incineração dos RSU.

FIGURA 5 – Processo de geração de energia através da queima dos RSU



Fonte: Disponível em: <<https://www.sobratema.org.br/Blog/Exibir/316105>>.

Essa técnica ocorre pela incineração da matéria orgânica em caldeiras, possuindo um alto custo-benefício devido à simplicidade do processo. Contudo, no Brasil essa prática ainda é pouco difundida, contando apenas com as indústrias de grande porte em função das políticas públicas voltadas para a redução na produção de resíduos aplicadas de forma obrigatórias a esses setores. Essas empresas possuem capacidade para queimar até 80.750 toneladas por ano, o que resulta entre 7,5 e 50 toneladas por dia (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Além da combustão, o tratamento térmico dos RSU ainda apresenta outras três formas: a pirólise, a gaseificação e o plasma (BOLCCHI *et al.*, 2018).

Diferente da incineração, a pirólise ocorre no interior de reatores e na ausência de oxigênio, convertendo a matéria orgânica em diferentes subprodutos. Esse processo é compreendido em duas etapas, sendo a primeira chamada de zona de secagem, a qual a matéria perde a umidade; e a segunda denominada de zona pirolítica, na qual acontece volatilização, oxidação e fusão, resultando na produção de gases compostos por nitrogênio (BOLCCHI *et al.*, 2018).

A zona pirolítica funciona em uma faixa de calor entre 300 e 1.600 °C. Já a gaseificação funciona como um processo de transformação da matéria orgânica, sólida ou líquida, em gás através da oxidação promovida pelo calor em conjunto com um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor quente). E por fim, o processo denominado “plasma” se refere a oxidação dos resíduos através de um arco elétrico que provoca a ionização do plasma através de temperaturas que variam de 5.000 a 15.000 °C. Assim, como a utilização do biogás, os processos de queima dos RSU garantem a diminuição dos impactos ambientais causados pela deposição inadequada e exacerbada de lixo e pela produção de metano. Contudo, ainda há muito no que se investir e aperfeiçoar no que diz respeito às políticas públicas voltadas para o manejo e tratamento dos RSU no Brasil (BOLCCHI *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temática acerca da geração de resíduos sólidos urbanos e o manejo ainda é algo que deve ser mais discutido no País, principalmente entre os setores do poder público, uma vez que as políticas instauradas para a possível resolução dos

problemas voltados para a destinação inadequada dos resíduos são deficitárias e ineficientes. A má administração do gerenciamento, tanto dos RSU quanto do saneamento básico no Brasil, resulta em consequências significativas para a população e para o meio ambiente. Dessa forma, novas técnicas de tratamento dos resíduos devem ser estudadas e exploradas para que seja possível amenizar os prejuízos causados pela disposição inadequada de grandes quantidades de lixo nos aterros e áreas similares. Dentre essas técnicas pode-se citar a compostagem, o tratamento biológico, a coleta seletiva e o tratamento térmico, as quais podem contribuir para a geração de empregos e renda, além de promover o desenvolvimento mais sustentável para as cidades através do reaproveitamento dos produtos gerados através dos RSU.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. 2020. Disponível

em: <https://www.migalhas.com.br/arquivos/2020/1/492DD855EA0272_PanoramaAbr elpe_-2018_2019.pdf>. Acesso em 02 de junho de 2022.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em 04 de julho de 2022.

AGUIAR, E.S.; RIBEIRO, M.M.; VIANA, J.H.; PONTES, A.N. Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 13, 2021. DOI: 10.1590/2175-3369.013.e20190263

BOLCCHI, P.; ANJOS, F.S.M.; SARTORI, M.A. Geração de energia elétrica a partir da queima do resíduo. In: **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. 2018. p. 1-6. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/III-041.pdf>>. Acesso em 06 de junho de 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União. Brasil - DF, 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em 04 de junho de 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília - DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 04 de junho de 2022.

BRONDANI, P.H.Z.; JUNG, C.R.; JOHANN, F.L.; OLIVEIRA, J.V. Análise da geração de biogás em aterro sanitário e conversão em energia. **Salão do Conhecimento**, v. 6, n. 6, 2020. Disponível em: <<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/17700/16434>>. Acesso em 05 de junho de 2022.

CARDOZO, B.C.; MANNARINO, C.F.; FERREIRA, J.A. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de

alterações na legislação brasileira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 123-131, 2021. DOI: 10.1590/S1413-415220190040

DALMO, F.C.; SIMÃO, N.M.; NEBRA, S.; SANT'ANA, P.H.M. Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: experiência das políticas públicas brasileiras e internacional. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 1, p. 39-50, 2018. DOI: 10.5380/rber.v7i1.57966

FERNANDES, E.A.; LEITE, G.B. Atuação dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 41, n. 2, p. 351-371, 2021. DOI: 10.1590/0101-31572021-3168

FERRARI, R.A.; ANDRADE, E.S. **Incineração de resíduos sólidos para recuperação de energia e seus impactos ambientais: um estudo de revisão no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1843/_incineraacao_de_resaiduos_saolidos_para_recuperaacao_de_energia_e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 06 de junho de 2022.

FREITAS, L.C.F.; SANTIAGO, Y.C.; RIBEIRO, N.S.; MARQUES, T.E.; PINTO, J.A. et al. Avaliação econômica e do potencial energético do biogás de aterro em Campinas-SP. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 6, 2019. DOI: 10.33448/rsd-v8i6.788

LAVNITCKI, L.; BAUM, C.A.; BECEGATO, V.A. Política Nacional dos Resíduos Sólidos: abordagem da problemática no Brasil e a situação na região sul. **Ambiente & Educação**, v. 23, n. 3, p. 379-401, 2018. DOI: 10.14295/ambeduc.v23i3.7783

LEITE, N.D.; PAIVA, B.K.V.; OLIVEIRA, M.Z.F.S.; SANTOS, G.O. Lixões, aterros controlados e aterros sanitários: o que mudou no Brasil após a publicação da Lei Federal 12.305/2010. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/55137>>. Acesso em 06 de junho de 2022.

MAIELLO, A.; BRITTO, A.L.N.P.; VALLE, T.F. Implementação da política nacional de resíduos sólidos. **Revista de Administração Pública**, v. 52, n. 1, p. 24-51, 2018. DOI: 10.1590/0034-7612155117

MELO, C.X.; DUARTE, S.T. Análise da compostagem como técnica sustentável no gerenciamento dos resíduos sólidos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, n. 10, p. 691-710, 2018. DOI: 10.21438/rbgas.051021

MENDONÇA, A.K.S.; BORNIA, A.C. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: análise das políticas públicas. **MIX Sustentável**, v. 5, n. 2, p. 109-122, 2019. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n2.109-122

MIRANDAS, N.M.; MATTOS, U.A.O. Revisão dos modelos e metodologias de coleta seletiva no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 14-20, 2018. DOI: 10.14393/SN-v30n2-2018

NASCIMENTO, M.C.B.; FREIRE, E.P.; DANTAS, F.A.S.; GIANANTE, M.B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n.1, p. 143-155, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019171125

OLIVEIRA, D.E.P.; MIRANDA, A.C.; KLEPA, R.B.; FRANCO, M.A.C.; DA SILVA, S.C. et al. Análise do potencial da produção de energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos na cidade de São Paulo. **Interciencia**, v. 43, n. 11, p. 778-783, 2018. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/journal/339/33957918007/html/#:~:text=Os%20resultados%20obtidos%20indicaram%20que,155%C3%97106%2Fano>>. Acesso em 06 de junho de 2022.

PACHECO, C.S.G.R.; SANTOS, R.P. Impactos Ambientais dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma análise a partir da ecoeficiência e da sustentabilidade. **Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente: Avanços, retrocessos e novas perspectivas**. v. 2, p. 349-363, 2022. DOI: 10.37885/220107208

PESSOA FILHO, J.S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. 2020. Dissertação de doutorado em engenharia mecânica - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG, 2020. DOI: 10.14393/ufu.te.2020.3004

PRATES, L.F.S.; PIMENTA, C.F.; RIBEIRO, H.F. Alternativas tecnológicas para tratamento de resíduos sólidos urbanos. **APPREHENDERE - Aprendizagem & Interdisciplinaridade**, v. 1, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://lataci.org/journal/index.php/apprehendere/article/view/40>>. Acesso em 04 de junho de 2022.

RIBEIRO, S.S.; BORGES, F.Q. Gestão de resíduos sólidos urbanos e geração de energia elétrica. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 2, p. 195-213, 2021. DOI: 10.47820/recima21.v2i2.95

SANTOS, F.F.S.; DALTRO FILHO, J.; MACHADO, C.T.; VASCONCELOS, J.F.; FEITOSA, F.R.S. O desenvolvimento do saneamento básico no Brasil e as consequências para a saúde pública. **Revista brasileira de meio ambiente**, v. 4, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/127>>. Acesso em 06 de junho de 2022.

SILVA, E. R.; TONELI, J.T.C.L.; PALACIOS-BERECHE, R. Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos com uso da tecnologia de digestão anaeróbica em biodigestores. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA**, v. 21, p. 1-10, 2020. Disponível em: <<http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/averma/article/view/1261>>. Acesso em 05 de junho de 2022.

SILVA, I.O.; TAGLIAFERRO, E.R.; OLIVEIRA, A.J. Gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares no município de Jales–SP e sua relação para com a política nacional de resíduos sólidos (PNRS). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 11475-11499, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n1-782

SOUZA, P.S. **Análise comparativa das usinas de tratamento mecânico-biológico brasileiras**. 2018. Dissertação de mestrado em recursos naturais - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, 2018. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3709>>. Acesso em 06 de junho de 2022.

VALENTE, S.R.D.P. Direito e políticas públicas: uma visão jurídico-institucional sobre o caso do saneamento básico no Brasil. **Revista Estudos Institucionais**, v. 5, n. 3, p. 1064-1092, 2019. DOI: 10.21783/rei.v5i3.440

VERAS, T.S.; FARIA, V.A. Gestão de resíduos da construção civil: Investigação sobre políticas de uso e destinação dos resíduos da construção e demolição em Palmas-TO. **Revista Integralização Universitária**, v. 13, n. 21, p. 131-144, 2019. DOI: 10.31501/1982-9280.2019V13N21p.131-144