

# GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

## GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FROM URBAN SOLID WASTE

Laura Neves<sup>1</sup> Ronaldo Mendes Evaristo<sup>2</sup> 

**Resumo:** A produção crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se um desafio para as administrações públicas, devido ao aumento da população. A implementação efetiva de um sistema de reciclagem enfrenta vários obstáculos, associados ao nível de desenvolvimento, hábitos e situação econômica da população, assim como à disponibilidade de tecnologias e infraestruturas adequadas. O tratamento e a disposição final dos RSU são etapas cruciais de gestão, determinando não apenas o destino desses resíduos, mas também seus impactos. A persistência de lixões em áreas urbanas e sua influência na saúde e no ambiente são preocupações significativas. Quando gerenciados adequadamente, esses resíduos podem ser uma fonte viável de energia elétrica, seja por meio da incineração ou da digestão anaeróbica, por exemplo. Este estudo, realizado como uma revisão integrativa no período de maio a outubro de 2023, selecionou cinco artigos publicados em português entre 2007 e 2016 após critérios de análise. Seu objetivo é esclarecer os problemas na gestão dos RSU no Brasil, as formas de tratamento, disposição final e os métodos de recuperação energética para a geração de eletricidade. A busca por informações foi conduzida no Google Acadêmico, Scielo e sites como o do Ministério do Meio Ambiente. A Política Nacional de Resíduos Sólidos visa promover práticas sustentáveis na produção e disposição final, porém é necessário aumentar os investimentos em pesquisa, infraestrutura e capacitação para aproveitar o potencial energético dos RSU. Em 2022, apenas 6% desses resíduos foram tratados como fonte de energia, enquanto mais de 29 mil toneladas foram destinadas a aterros controlados e lixões.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos. Geração de Energia Elétrica. Gestão de Resíduos. Meio Ambiente. Sustentabilidade.

**Abstract:** The increasing production of urban solid waste (USW) has become a challenge for public administrations due to population growth. The effective implementation of a recycling system faces various obstacles associated with the population's level of development, habits, and economic situation, as well as the availability of suitable technologies and infrastructure. The treatment and final disposal of USW are crucial management stages, determining not only the destiny of these waste materials but also their impacts. The persistence of open dumps in urban areas and their influence on health and the environment are significant concerns. When properly managed, these wastes can be a viable source of electrical energy, whether through incineration or anaerobic digestion, for instance. This study, conducted as a review between May and October 2023, selected five articles in Portuguese published between 2007 and 2016

---

<sup>1</sup> Engenheira Eletricista, Indústrias Klabin S. A., Unidade Monte Alegre, l.neves@klabin.com.br

<sup>2</sup> Professor, Doutor, IFPR-Campus Telêmaco Borba, ronaldo.evaristo@ifpr.edu.br

based on specific analysis criteria. Its objective is to elucidate the issues in USW management in Brazil, the forms of treatment, final disposal, and methods of energy recovery for electricity generation. Information retrieval was carried out on Google Scholar, Scielo, and websites such as the Ministério do Meio Ambiente. The National Solid Waste Policy aims to promote sustainable practices in production and final disposal; however, there is a need to increase investments in research, infrastructure, and training to harness the energy potential of USW. In 2022, only 6% of these wastes were treated as an energy source, while over 29 thousand tons were destined for controlled landfills and open dumps.

**Keywords:** Urban Solid Waste. Electricity Generation. Waste Management. Environment. Sustainability.

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento sustentável vem sendo primordial para a humanidade, uma vez que seu conceito é pautado no progresso da geração atual, garantindo a que as gerações futuras também possam se desenvolver conforme suas necessidades. Quando se trata de fontes de energias renováveis, o Brasil possui um vasto potencial, o que o coloca em posição única para contribuir significativamente na busca de um futuro mais sustentável. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2023, a matriz elétrica brasileira é composta por 87,9% de energias renováveis, tendo como base o ano de 2022, um cenário bem diferente, quando comparado a matriz elétrica mundial, do mesmo ano em questão, que apresenta 26,6% de energias renováveis (EPE, 2023).

Isso demonstra o comprometimento do país em adotar fontes de energias limpas e sustentáveis, alinhando-se ao potencial demográfico existente. Esta direção exige não apenas incentivos, mas também o desenvolvimento de novas tecnologias, a fim de assegurar um futuro sustentável. A trajetória do potencial renovável de fontes energéticas, no Brasil, visa proporcionar energia limpa em abundância e acessível, promovendo o fortalecimento da economia e a redução significativa dos impactos ambientais (ENGEBIO, 2010; HOOGWIJK, 2003).

A Criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, foi um marco importante no Brasil para promover a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Este conjunto de diretrizes fundamenta-se na ideia de: não gerar, reduzir, reutilizar, reciclar, tratar e por fim, dispor adequadamente os rejeitos, admitindo também a possibilidade de adotar tecnologias de recuperação energética (BRASIL, 2022a).

A PNRS tinha como meta a eliminação dos lixões e aterros controlados até o ano de 2014, problemática destacada como um dos maiores desafios no gerenciamento sustentável. Como a meta não foi atingida no prazo. Sucedeu-se por meio do decreto nº 11.043/2022 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos

(Planares), como um instrumento da PNRS, ele apresenta caminhos, diretrizes, estratégias e ações para que seja possível alcançar a melhor gestão dos resíduos sólidos no país (BRASIL, 2022b). O Planares introduziu novos prazos de maneira escalonada para que os municípios atendam a disposição final adequada ambientalmente dos rejeitos, tendo como data final para atingir a meta em 02 de agosto de 2024 (BRASIL, 2022b).

De acordo com o relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o percentual de RSU sem disposição adequada ano de 2022 foi de 39% (ABRELPE, 2022). Fato preocupante, visto que sem a disposição final adequada pode ocorrer a poluição do solo, água e ar durante a decomposição dos resíduos, ocasionando sérios problemas ambientais e reduzindo a qualidade de vida da população (FIRMO, 2013).

Quando os RSU são corretamente direcionados para aterros sanitários seguros e ambientalmente responsáveis, é viável capturar o biogás gerado durante a decomposição da matéria. Este processo oferece a oportunidade de aproveitamento energético, prevenindo sua liberação na atmosfera, uma vez que o biogás é altamente prejudicial ao efeito estufa. (HENRIQUES, 2004).

Neste trabalho aborda-se o panorama da gestão dos RSU no Brasil, as formas de tratamento e disposição final e os tipos de recuperação energética para a geração de energia elétrica.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Resíduos Sólidos Urbanos**

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR), os RSU são provenientes das atividades em domicílios urbanos, conhecidos como resíduos domiciliares, assim como aqueles que resultam da varrição, da limpeza de áreas públicas e de outros serviços relacionados à limpeza nas áreas urbanas, denominados resíduos de limpeza urbana (SINIR+, 2020).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas define resíduos sólidos através da NBR 10.004, onde dimensiona a complexidade e diversidade dos setores que se originam:

Resíduos sólidos: Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 1987, p. 1).

A NBR 10.004 publicada em 1987, recebeu uma atualização em 2004, que classifica os resíduos sólidos quanto a origem, processo e riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

De acordo com ABNT (1987, p. 3-5), os resíduos, dividem-se em três grupos, sendo eles: classe I) considerada perigosa devido à sua natureza inflamável, corrosiva, reativa, tóxica e patogênica; classe II A), que compreende resíduos não perigosos, porém não inertes, pois podem ter solubilidade em água acima dos limites estabelecidos pela norma ABNT, o que poderia ocasionar reações prejudiciais ao meio ambiente, representando um risco de poluição; e classe II B) que engloba resíduos não perigosos e inertes, os quais nenhum de seus componentes se dissolve em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

Para além da sua categorização baseada nos potenciais impactos ao meio ambiente, os resíduos podem ser submetidos a uma classificação de acordo com a sua constituição física (seco ou molhado), a sua composição química (matéria de natureza inorgânica ou orgânica), bem como a sua origem (fonte geradora) (PAVAN, 2010).

No contexto da gestão, Pavan (2010) ainda classifica os resíduos com base em sua origem e frequentemente considera esse fato como uma prática mais relevante. Sob esta perspectiva, os resíduos podem ser categorizados em várias fontes geradoras distintas, tais como resíduos domiciliares, comerciais, provenientes de estabelecimentos de caráter público, serviços de saúde e instalações hospitalares, portos e aeroportos, terminais rodoviários e

ferroviários, indústrias, atividades agrícolas, construção civil e até mesmo resíduos radioativos (ou seja, resíduos nucleares).

## **2.2 Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**

A implementação efetiva de um sistema de reciclagem, no Brasil, segundo Mannarino et al. (2016) enfrenta diversos obstáculos, entre estes: 1) a falta de engajamento da população na coleta seletiva; 2) a limitada participação do setor industrial no desenvolvimento de uma logística reversa eficiente; 3) a carência de infraestrutura adequada para a separação dos resíduos por tipo de material; 4) a questão das longas distâncias entre os locais de geração de resíduos e as indústrias de reciclagem, principalmente concentradas nas regiões Sul e Sudeste do país.

A abordagem e a resolução dos desafios relacionados à gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), conforme discutido por Pavan (2010), abrangem todas as etapas, desde sua origem até a disposição final. Essas etapas estão intrinsecamente ligadas à comunidade envolvida, considerando seu nível de desenvolvimento, hábitos, situação econômica, bem como a disponibilidade de infraestrutura e tecnologias apropriadas para o tratamento e disposição adequada dos resíduos.

A Constituição Federal do Brasil, no Artigo 30, nos incisos I, II e V estabelecem a competência dos municípios para legislar sobre questões de interesse local, complementarem leis federais e estaduais e organizarem serviços públicos de interesse da comunidade. Os municípios têm a responsabilidade de criar e aplicar normas específicas para a gestão dos RSU dentro de suas jurisdições, garantindo a coleta adequada e a disposição final ambientalmente correta dos RSU (BRASIL,1988).

## **2.3 Tratamento e Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos**

O tratamento e a disposição final dos RSU surgem como etapas críticas no ciclo de gestão, determinando não apenas o destino desses resíduos, mas também seu impacto direto no meio ambiente e na sociedade. Nesta seção,

propõe-se explicar as principais modalidades de tratamento e disposição final de RSU, isto é, os aterros sanitários, os aterros controlados e os lixões.

Para Figueiredo (2007), o aterro sanitário é uma prática de disposição final de RSU que envolve o confinamento controlado desses resíduos no solo, seguindo rigorosas normas operacionais. Ainda para a autora, na implantação de um aterro sanitário, são conduzidos estudos geológicos e topográficos, a fim de selecionar uma área adequada que não comprometa o meio ambiente; a impermeabilização do solo é realizada por meio de camadas de argila e uma geomembrana de polietileno de alta densidade, para evitar a infiltração de líquidos percolados, como o chorume, no solo.

Ainda sobre aterro sanitário, a deposição do lixo sobre o terreno, conforme Figueiredo (2007), é seguida pelo seu recobrimento com camadas de solo local, isolando-o do ambiente circundante. Durante este processo, câmaras se formam, permitindo a produção de gases e a liberação do chorume. O chorume é coletado por meio de tubulações e encaminhado para tanques de tratamento. Os gases gerados durante a decomposição dos resíduos também são capturados e podem ser direcionados para queima ou aproveitados como fonte de energia. A autora explicita que a localização do aterro deve ser criteriosamente escolhida, abrangendo uma extensa área e, devido a possíveis inconvenientes como odores desagradáveis e tráfego de caminhões de lixo, deve estar situada a uma distância considerável das áreas urbanas.

Na Figura 1, pode-se observar o esquema de um aterro sanitário com as descrições das etapas do processo de armazenamento e tratamento dos RSU.

Para Pavan (2010), os aterros controlados são estratégias de disposição de resíduos que têm como objetivo reduzir os impactos ambientais. Neste método, os resíduos são contidos e, ao final de cada jornada de trabalho cobertos com uma camada de material inerte. Além disso, a pesquisadora salienta que geralmente, são empregados princípios de engenharia para tratar e coletar os líquidos percolados gerados, embora tipicamente não haja a aplicação de uma impermeabilização na base.

**Figura 1** - Corte da seção de um aterro sanitário.



**Fonte:** Portal Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/aterro-sanitario/corte-da-secao-de-um-aterro-sanitario/>. Acesso em: 27 set. 2023.

Pavan (2010) discorre que os lixões são caracterizados pela descarga direta de resíduos, resultando em sérios impactos à saúde pública devido a proliferação de vetores transmissores de doenças. Além disso, estes locais emitem odores desagradáveis e causam a contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas por meio do chorume gerado. Os lixões para a pesquisadora também são marcados pela falta de controle quanto aos tipos de resíduos recebidos, abrangendo, desde resíduos industriais até resíduos de serviços de saúde. Muitas vezes, lixões abrigam catadores que residem no local e dependem da coleta de materiais recicláveis para sua subsistência.

## 2.4 Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos

Nesta seção são abordadas as duas principais tecnologias utilizadas para a geração de energia através dos RSU: 1) a incineração, que se mostra com uma alta eficiência na solução de toneladas de RSU dispostos inadequadamente e 2) o biogás que pode ser gerado tanto de resíduos orgânicos úmidos homogêneos, quanto de RSU que possuem caráter heterogêneo em sua formação.

A incineração, para CEMPRE (2018), é o processo mais difundido dentre os tratamentos térmicos em alta temperatura, geralmente operando acima de 800°C. Países como Japão, Suíça e Suécia que possuem pouco

território disponível para aterro sanitário, apresentam um grande número de unidades de tratamento de resíduo por incineração em operação, com tendência acentuada de crescimento neste setor, devido a incorporação de sistemas de recuperação energética e tratamento de gases de combustão mais eficientes nas novas unidades, o que os torna mais interessantes do ponto de vista ambiental e econômico.

No processo de incineração as cadeias de carbonos são quebradas e os compostos orgânicos são reduzidos a seus constituintes minerais, principalmente dióxido de carbono gasoso e vapor d'água, e a sólido inorgânico (cinzas).

A composição do lixo está diretamente ligada ao desenvolvimento do País. Logo, quando se trata de reaproveitamento energético dos RSU, a composição do mesmo é um quesito de relevância. Pavan (2010) traz as análises que precisam ser feitas com relação as características do resíduo que será incinerado e que irá influenciar na eficiência do processo como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1** – Características do resíduo que será incinerado.

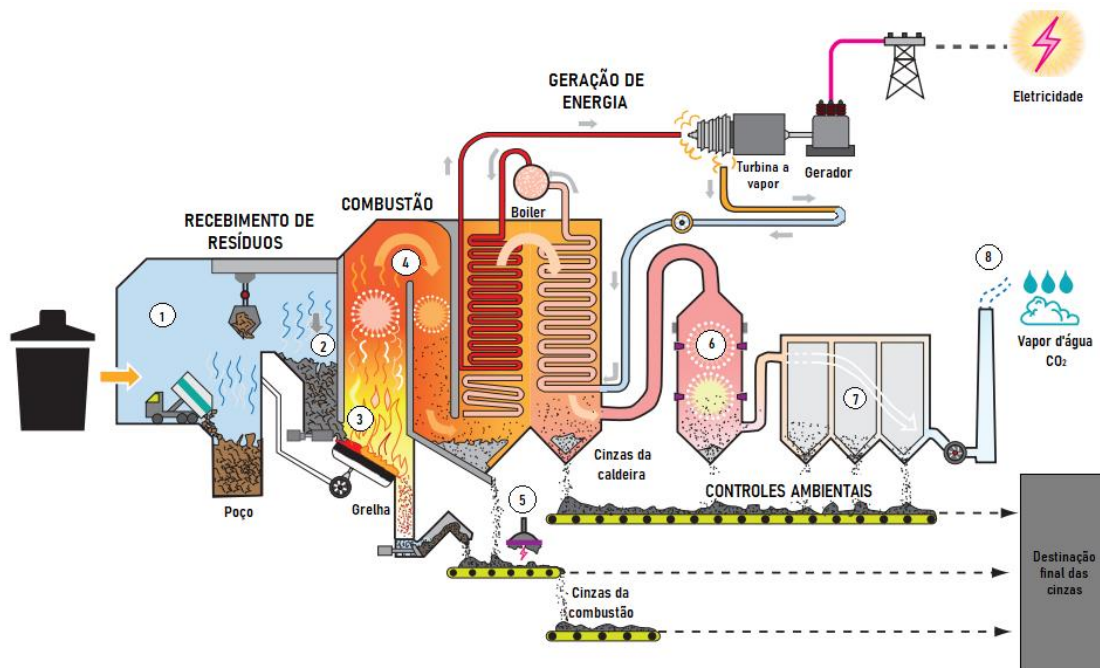
<b>Características</b>	<b>Descrição</b>
Poder calorífico inferior (PCI)	Determina a quantidade de energia útil que pode ser liberada durante o processo de queima do RSU. O PCI é proporcional às potências liberadas no interior do incinerador e temperaturas atingidas, ou seja, quanto maior o PCI, maior será a potência liberada no interior do incinerador e maiores as temperaturas atingidas.
Análise imediata	Determina as quantidades de água, cinza e matéria volátil dos resíduos;
Análise elementar	Determina a quantidade de carbono, hidrogênio e nitrogênio.
Teores de elementos tóxicos	A partir dos elementos tóxicos médios presentes nos resíduos como mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, níquel, cloro e enxofre, é possível estimar o potencial de geração e formação de compostos tóxicos tanto no processo de incineração quanto nas cinzas, para que seja possível dimensionar o sistema de limpeza de gases e a umidade.

**Fonte:** PAVAN (2010).

Na Figura 2 é apresentado o processo de tratamento térmico. De acordo com NEED (2017), na primeira etapa ocorre o recebimento de resíduos que alimentam as moegas (1) por meio de garras (2); das moegas, os resíduos são levados para o incinerador através de grelhas (3); como o incinerador (4) opera em altas temperaturas, o calor que é liberado pelos gases é utilizado para

produzir vapor superaquecido no interior da caldeira; o vapor alimenta continuamente um turbo-gerador, para geração de energia elétrica; as cinzas que sobram sobre as grelhas e fundo da caldeira passam por separadores eletromagnéticos (5); e os gases passam por sistemas de tratamento para a remoção dos poluentes (6-7); e por fim são lançados na atmosfera por meio de uma chaminé (8).

**Figura 2** – Processo de tratamento térmico dos RSU por incineração.



**Fonte:** Adaptado de NEED, 2017.

De acordo com Mannarino et al. (2016), os incineradores são eficazes na redução do volume e peso dos resíduos, além de gerarem energia elétrica e térmica. No entanto, é importante notar que esses processos também resultam na produção de resíduos que demandam tratamento e disposição apropriados.

Conforme NEED (2017), de 100 quilos de lixo típico, podem ser incinerados mais de 80 quilos como combustível para a geração de eletricidade em uma usina. E ainda de acordo com o documento, uma tonelada de lixo, gera cerca de 35 quilowatts-hora (kWh) de energia elétrica.

Segundo Henriques (2004), a utilização do gás de lixo (GDL) ou do Biogás representa a forma mais simples de aproveitar a energia dos RSU. O GDL, com sua composição molar variando de 40 a 55% de metano, 35 a 50%

de dióxido de carbono e até 20% de nitrogênio, possui um poder calorífico entre 14,9 e 20,5 MJ/m<sup>3</sup>, ou cerca de 5.800 kcal/m<sup>3</sup>. A geração de biogás ocorre pela decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos em aterros sanitários. Essa tecnologia, já amplamente conhecida e utilizada em todo o mundo, oferece meios consolidados para aproveitar essa fonte energética.

De acordo com Henriques (2004), a conversão de energia elétrica funciona com a rede coletora de biogás conectada ao motor ou turbina, e esta, conectada a um gerador. Os equipamentos devem estar adequados para receber o gás. Com cuidados de manutenção é possível produzir eletricidade a uma confiabilidade de 95%. O autor ainda ressalta, que a produção de energia elétrica é vantajosa, pois agrega valor ao biogás. A cogeração de eletricidade e energia térmica (vapor), a partir do biogás, pode representar uma alternativa ainda mais vantajosa. Enquanto a eficiência da geração elétrica isolada varia de 20% a 50%, o uso da cogeração proporciona eficiências mais elevadas devido à disponibilização do vapor gerado no processo.

Pavan (2010) explica a digestão anaeróbia como um processo de transformação de resíduos pela decomposição microbiana, ocorrendo na ausência de oxigênio, resultando na produção de líquidos e gases. Esse procedimento é usualmente realizado em aterros sanitários, onde os gases resultantes dessa decomposição, conhecidos como biogás, consistem principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

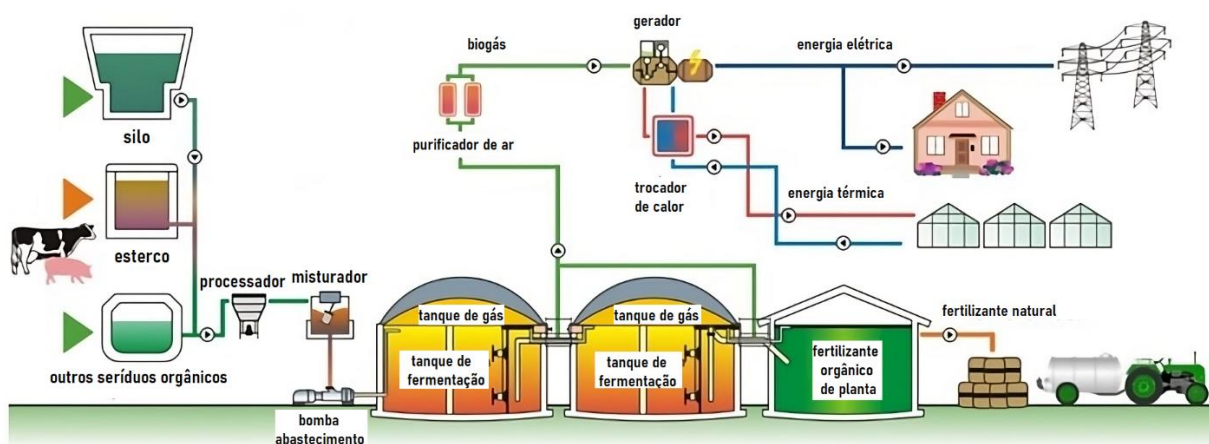
Henriques (2004) investigou minuciosamente o panorama atual das tecnologias de digestão anaeróbia voltadas para o tratamento da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Em sua pesquisa, ela descreve a digestão anaeróbia como um processo de decomposição de material orgânico sem a presença de oxigênio, resultando predominantemente na produção gasosa de 55% de metano (CH<sub>4</sub>) e 45% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), juntamente com um subproduto utilizado como fertilizante para o solo.

Segundo Costa (2010), o processo de tratamento de resíduos com a digestão anaeróbia é dividido em duas fases: 1) a separação dos materiais recicláveis (mecânica); 2) a estabilização da parte orgânica para torna-la útil em outra utilização (biológica).

Para Pavan (2010) existem diversos fatores que influenciam na taxa de geração de gases de aterro na digestão anaeróbia, como: 1) a composição do resíduo, quanto maior a porcentagem orgânica, maior o potencial na geração de metano; 2) o ambiente anaeróbico, como a decomposição é feita em ambiente sem oxigênio, é importante cobrir os resíduos com argila ou terra, para criar condições adequadas; 3) a alta umidade pode aumentar a geração dos gases, facilitando a vida das bactérias decompositoras; 4) com relação à acidez e temperatura, as bactérias atingem maior produtividade com pH entre 6,8 e 7,2, e temperatura entre 29 e 38°C.

A Figura 3 apresenta o processo de tratamento de resíduos sólidos por meio da digestão anaeróbica, com as principais etapas para a produção de biogás e energia elétrica. Inicialmente, o material é direcionado para um processador e, em seguida, para um misturador. Isso resulta no substrato ou lodo, rico em matéria orgânica, que é bombeado para os tanques de fermentação, onde ocorre o processo de digestão anaeróbica, gerando o biogás (BRANCO,2023).

**Figura 3** – Processo de uma planta de biogás.



**Fonte:** *ElectricalLibrary.com*. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/aterro-sanitario/corte-da-secao-de-um-aterro-sanitario/>. Acesso em: 27 set. 2023.

Posteriormente, o biogás passa por um processo de purificação antes de entrar na turbina-gerador, onde a energia térmica presente no gás é convertida

em energia elétrica. O subproduto da decomposição pode ser utilizado como fertilizante, tornando o processo ainda mais sustentável.

### 3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido no período de maio a outubro de 2023, utilizando nas buscas os termos: RSU, gestão de RSU, e geração de energia elétrica. Os repositórios utilizados foram o Google Acadêmico e a Scielo. Com o objetivo de elucidar os problemas encontrados na gestão dos RSU, no Brasil, as formas de tratamento, disposição final, e os tipos de recuperação energética para a geração de energia elétrica. Como critérios de seleção de estudo utilizou-se os temas de gestão e disposição de RSU, e recuperação energética para geração de energia elétrica. Não sendo excluídos os que abordavam somente um dos temas. Os critérios de seleção foram definidos com base na leitura dos resumos dos artigos.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo, realizado como uma Revisão Integrativa no período de maio a outubro de 2023, selecionou cinco artigos em português publicados entre 2007 e 2016 após critérios de análise. Além disso, foram inseridas informações dos sites de Empresa de Pesquisa Energética, Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Ministério do Meio Ambiente, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Associação Brasileira de Normas Técnicas Norma Brasileira 10.004, Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos e Compromisso Empresarial para Reciclagem. No Quadro 1 estão os critérios de análise e os autores selecionados pelos critérios de análise.

**Quadro 1** – Critérios de análise.

Item	Autor	Nº	Critérios de Análise
		1	<b>Panorama dos RSU:</b> Crescimento desordenado da população se o planejamento de centros urbanos dificulta as ações de manejo dos resíduos. Ações nesta questão são postergadas por falta de recurso e causam problemas de saúde e ambiente. Migração rural para a cidade

a)	Figueiredo, 2007		faz com que as prefeituras corram contra o tempo para disponibilizar lugares para disposição correta do lixo.
		2	<b>Tratamento e disposição final dos RSU:</b> O aterro sanitário é a alternativa mais interessante para a geração do biogás. Os gases liberados durante a decomposição do resíduo são captados e podem ser utilizados como fonte de energia.
		3	<b>Geração de energia elétrica:</b> Turbina a gás (ciclo de ar-padrão ideal brayton e brayton com regeneração e microturbinas) e motores de combustão interna, motores ciclo diesel e ciclo otto.
b)	Firmo, 2013	1	<b>Panorama dos RSU:</b> Principais fatores com correlação a quantidade de resíduos gerados em um país estão: aumento populacional, nível de urbanização e poder de compra da população. Em termos econômicos no Brasil, as empresas de coleta, tratamento e reciclagem de RSU são incipientes, diferente de países desenvolvidos que movimentam milhares de pessoas.
		2	<b>Tratamento e disposição final dos RSU:</b> Sem a disposição final adequada, a decomposição dos resíduos pode poluir o solo, águas e o ar ocasionando problemas ambientais e diminuição da qualidade de vida da população. Os aterros sanitários permitem receber resíduos em diferentes quantidades e composições além de gerar energia através do tratamento de biogás. Porém, uma desvantagem dessa tecnologia de tratamento e disposição final de resíduos consiste na necessidade do controle e monitoramento ambiental da área durante e após longo tempo de fechamento do aterro.
		3	<b>Geração de energia elétrica:</b> A disposição final de RSU em aterros sanitários e biodigestores, tem como consequência a geração de biogás, composto em sua grande maioria por dióxido de carbono e metano, este último, é um gás de efeito estufa (GEE), por ser um combustível é considerado de grande relevância, permitindo seu aproveitamento energético.
c)	Henriques, 2004	1	<b>Panorama dos RSU:</b> Como o ao de artigo é 2004, não foi avaliado o panorama nacional no período.
		2	<b>Tratamento e disposição final dos RSU:</b> Aterro sanitário não é considerado como uma alternativa para a disposição final de resíduos pois não se configura como uma estratégia condizente com as preocupações.
		3	<b>Geração de energia elétrica:</b> O autor faz uma análise dos impactos ambientais nas principais formas de geração: Gás de lixo, digestão anaeróbia e incineração.
d)	Mannarino <i>et al.</i> , 2016	1	<b>Panorama dos RSU:</b> O Brasil enfrenta dificuldades na implantação do sistema de reciclagem devido à falta de adesão da população à coleta seletiva, à pouca participação da indústria na logística reversa e à falta de locais apropriados para a separação dos materiais. Além disso, as longas distâncias entre geradores de resíduos e indústrias de reciclagem dificultam o processo. Enquanto muitos municípios resolvem problemas básicos na gestão de resíduos, cidades maiores buscam tecnologias avançadas de tratamento.
		2	<b>Tratamento e disposição final dos RSU:</b> É preciso ainda considerar que a redução da disposição final de resíduos para aterros sanitários está também ligada aos custos para execução dos dispositivos de controle ambiental e do monitoramento dos mesmos exigidos pela legislação local.
		3	<b>Geração de energia elétrica:</b> A recuperação energética de resíduos sólidos ganha importância quando analisado o cenário de demanda de energia elétrica no Brasil. Embora eficientes na redução do volume e do

			peso dos resíduos e na produção de energia elétrica e térmica, os incineradores geram resíduos do processo que precisam ser adequadamente tratados e/ou dispostos.
e)	Pavan, 2010	1	<b>Panorama dos RSU:</b> O autor retrata o panorama dos resíduos nos anos antecedentes a 2010. Destaca a falta de dados sistematizados e atualizados, como: 1) caracterização da quantitativa e/ou qualitativa; 2) frequência da coleta; e 3) local da disposição final. Além de pesquisas conterem números conflitantes.
		2	<b>Tratamento e disposição final dos RSU:</b> o artigo antecede a regulamentação da PNRS, em 2010. O autor ressalta a falta de uma política nacional de resíduos, mesmo considerando ser competência do município, o tratamento e a disposição do resíduo. Aponta a necessidade de mecanismos que extrapolem as competências municipais e estaduais, como normas gerais de âmbito nacional.
		3	<b>Geração de energia elétrica:</b> Em 2010 a incineração era uma técnica pouco utilizada no Brasil, restrita apenas para uma parte de resíduos hospitalares, embalagens de agrotóxicos e certos resíduos industriais hospitalares. A Geração de energia elétrica a partir de gás de aterro, é uma excelente alternativa, por apresentar disponibilidade de tecnologias para praticamente qualquer tamanho de aterro e a alta eficiência energética, especialmente quando o ciclo é combinado, por outro lado, uma desvantagem desse modelo, são os altos custos em investimentos iniciais e maiores gastos para o pré-tratamento do gás. As principais tecnologias disponíveis no mercado são: turbina a gás, microturbinas e motores de combustão interna.

**Fonte:** Autoria própria.

Com relação ao Quadro 1, pode-se fazer uma correlação de informações sobre as visões dos autores selecionados. No panorama de RSU, Figueiredo (2007) e Firmo (2013) abordam o crescimento populacional desordenado, a urbanização e a migração rural-urbana como influências no aumento dos resíduos. Pavan (2010) destaca a falta de dados sistematizados e atualizados sobre resíduos, enquanto Firmo (2013) ressalta a correlação entre aumento populacional, urbanização e poder de compra na geração de resíduos.

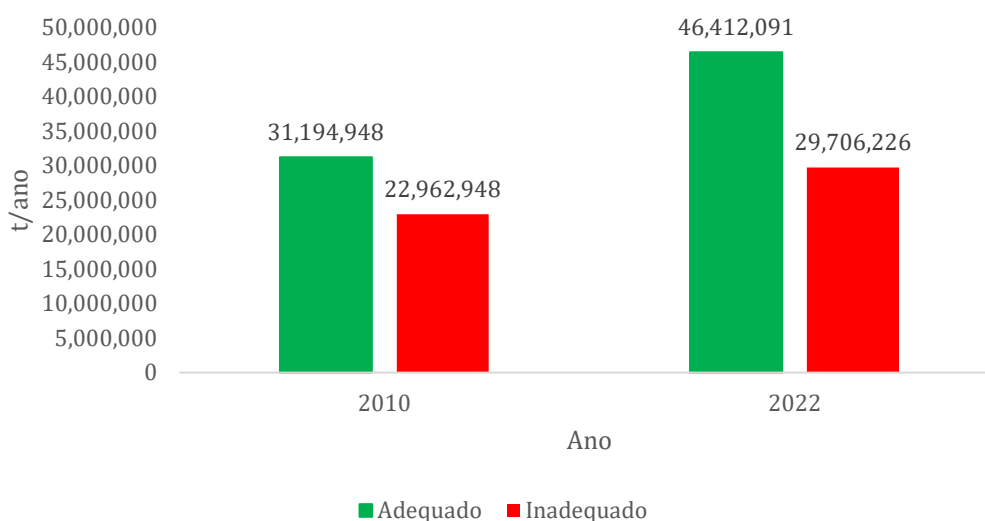
No que diz respeito ao tratamento e disposição final dos RSU, Figueiredo (2007) e Firmo (2013) concordam sobre a importância dos aterros sanitários na disposição final, aproveitando o biogás gerado durante a decomposição dos resíduos como fonte de energia. Mannarino *et al.* (2016) destaca a poluição ambiental causada pela falta de disposição final adequada e a necessidade de monitoramento ambiental mesmo após o fechamento do aterro. Henriques (2004) contesta a viabilidade do aterro sanitário como estratégia condizente com as preocupações ambientais.

Na geração de energia elétrica, Figueiredo (2007) e Firmo (2013) focam na geração de energia a partir do biogás dos aterros sanitários, mencionando sua relevância como fonte de energia. Já sobre a incineração, Pavan (2010) e Mannarino *et al.* (2016) discutem como técnica de geração de energia elétrica, com destaque para os altos custos e a falta de utilização generalizada no Brasil em certos tipos de resíduos nos respectivos anos de pesquisa dos autores.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2023, tendo como base o ano de 2022, a geração de energia elétrica no Brasil foi de 586,1 TWh de energia, com aumento de 2,3% em relação ao ano de 2021. A participação de fonte renováveis na matriz elétrica brasileira no ano 2022 foi de 87,9 TWh. Apesar da redução de 32,3% na geração termelétrica em 2022, houve um aumento de 12,5% na contribuição de biomassa com relação ao ano de 2021. (EPE, 2023).

De acordo com a PNRS, a disposição final é uma das possíveis alternativas de destinação ambientalmente adequada desde que as normas sejam seguidas de forma a prevenir danos à saúde pública, garantindo a segurança e minimizando os impactos ambientais adversos (ABRELPE, 2022). O Gráfico 1, mostra os traços da disposição final nos anos de 2010, ano de criação da PNRS, e de 2022, último panorama publicado pela ABRELPE até o momento.

**Gráfico 1** – Disposição final dos RSU.



**Fonte:** Adaptado de ABRELPE (2010) e ABRELPE (2022).

O Gráfico 1 revela pontos positivos na gestão dos RSU no Brasil, entre os anos de 2010 e 2022, isto é, nota-se uma evolução significativa na disposição adequada, passando de aproximadamente 31.194.948 toneladas em 2010 para 46.412.091 toneladas em 2022, representando um aumento de 48,78% na destinação correta dos resíduos. Por outro lado, no mesmo período também se observa um aumento na destinação incorreta, de 22.962.948 toneladas para 29.706.226 toneladas, isto é, aumento de 29,37%.

Ainda pelo Gráfico 1, é possível notar avanços feitos na gestão de RSU entre 2010 e 2022. Do total de RSU produzidos em 2010 tinham-se 57,60% de resíduos destinados adequadamente ante 42,40%, de resíduos destinados inadequadamente. Em 2022, esses percentuais se alteram, respectivamente, para 60,97% e 39,03%.

Apesar dos esforços, é crucial ressaltar que o volume de resíduos inadequadamente destinados ainda representa uma parcela significativa. Este valor, apesar de menor que o crescimento na disposição adequada, indica a persistência de desafios na gestão eficiente desses resíduos.

A Tabela 2, traz os dados referentes aos tipos de disposição final de RSU no Brasil em 2022, segundo o panorama da ABRELPE. A maior parte, cerca de 55%, é direcionada para aterros sanitários sem aproveitamento energético, indicando uma predominância na disposição final sem considerar alternativas sustentáveis. Em contrapartida, os aterros sanitários com aproveitamento energético, representando aproximadamente 6%, mostram uma abordagem mais consciente, com aproveitamento desses resíduos. Os aterros controlados, com cerca de 23%, representam uma modalidade intermediária, enquanto os lixões, com aproximadamente 16%, ainda persistem como locais de descarte inadequado.

A geração de energia elétrica por meio de RSU tem sua principal contribuição na geração termelétrica, mais especificamente, na utilização de biomassa como combustível. Pavan (2010) classifica os resíduos de biomassa em: primários, aqueles produzidos na agricultura e silvicultura; secundários, são os resíduos gerados durante o processo produtivo, industriais de

alimentos, bebidas, papéis e etc.; e terciários, aqueles que por meio de resíduos resultantes dos pós-uso dos resíduos secundários e correspondem a fração orgânica dos RSU.

**Tabela 2** – Tipos de disposição final – Cenário base – Massa de RSU 2022.

<b>Disposição</b>	<b>Massa (t/ano)</b>	<b>(%)</b>
Aterro sanitário (sem aproveitamento energético)	42.141.039,68	55
Aterro sanitário (com aproveitamento energético)	4.271.051,32	6
Aterro controlado	17.322.000,00	23
Lixão	12.384.226,00	16
<b>Total</b>	<b>76.118.317,00</b>	<b>100</b>

**Fonte:** Adaptado da ABRELPE (2022).

O Brasil possui 23.510 empreendimentos de geração de energia elétrica, em operação no ano de 2023, totalizando 198.560,5 MW de potência outorgada (potência que a usina foi autorizada a operar em sua matriz elétrica (ANEEL, 2023)). A geração por meio de biomassa contém 636 empreendimentos em operação, totalizando 17.368,7 MW de potência outorgada.

Na Tabela 3, são apresentadas as usinas de geração de energia elétrica a partir de RSU no Brasil em operação no ano de 2023 e seus respectivos estados (ANEEL, 2023). No total, são listadas 37 usinas de RSU, com uma potência outorgada combinada de aproximadamente 234.550,6 kW.

As potências outorgadas variam significativamente entre os estados, indicando diferentes capacidades de geração de energia a partir de RSU. Destaque para São Paulo (SP) que possui a maior quantidade de usinas de RSU listadas, com 10 usinas, e a maior potência outorgada, totalizando 81.480 kW.

**Tabela 3** – Usinas de geração de energia em operação com resíduos sólidos no Brasil.

UF	Tipo de Usina	Combustível Final	Quantidade	Potência Outorgada (kW)
SP	RSU	Biogás	10	81480
PE	RSU	Biogás	1	28520
RJ	RSU	Biogás	4	24230
BA	RSU	Biogás	1	19730
MG	RSU	Biogás	4	15233,6
RS	RSU	Biogás	3	14744
PR	RSU	Biogás	1	9982
SP	RSU	RSU	2	7800
PB	RSU	Biogás	1	5704
SC	RSU	RSU	1	4680
MG	RSU	RSU	1	4278
AM	RSU	Carvão	1	3000
DF	RSU	RSU	1	2850
MA	RSU	RSU	1	2805
SP	RSU	Carvão	1	2700
MS	RSU	Carvão	1	2550
SC	RSU	Biogás	1	2264
RS	RSU	RSU	2	2000
<b>Total</b>			<b>37</b>	<b>234550,6</b>

**Fonte:** Adaptado do Sistema de Informações de Geração – ANEEL 2023.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de energia elétrica a partir de RSU no Brasil é uma resposta vital frente ao desafio crescente do descarte inadequado desses resíduos, notadamente em lixões, onde a liberação descontrolada de metano agrava o efeito estufa.

Apesar de ser um problema socioeconômico e ambiental, a legislação nacional ainda depende, em grande parte, de esforços locais. Os municípios mais densamente populosos enfrentam dificuldades significativas, pois lidam

com volumes crescentes de resíduos e escassez de espaço para descarte adequado.

Neste cenário, a tecnologia de geração de energia a partir de RSU se mostra como uma alternativa viável, ainda que não definitiva. É imprescindível direcionar esforços para uma gestão eficiente desses resíduos, buscando destinos mais adequados do que os aterros sanitários. A diversificação de abordagens, como a digestão anaeróbica e a incineração, oferece soluções promissoras, gerando não apenas energia, mas também compostos orgânicos e reduzindo o volume de resíduos destinados aos aterros.

Embora existam usinas em operação em diversas regiões do Brasil, como em São Paulo, que gera mais de 81 MW de energia elétrica a partir do biogás proveniente dos RSU, apenas uma pequena parcela, cerca de 6%, é utilizada como fonte de energia. São mais de 29 milhões de toneladas de resíduos sólidos no ano de 2022 direcionados a aterros controlados e lixões.

Os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, previstos na Lei nº 12.305, são fundamentais para preservar a saúde pública e o meio ambiente, promovendo práticas sustentáveis na produção e no descarte final dos resíduos. No entanto, alcançar esses objetivos implica custos elevados para implementar tecnologias limpas, integrar a gestão de resíduos e ajustar processos produtivos. Isso demanda investimentos substanciais em pesquisa, infraestrutura e capacitação, representando um desafio financeiro significativo para empresas e órgãos responsáveis. Apesar da relevância dessas metas para a sustentabilidade, os custos elevados são um fator crítico que demanda um planejamento estratégico e investimentos de longo prazo.

Concluindo, a geração de energia a partir de RSU no Brasil apresenta grande potencial, mas demanda esforços coordenados, investimentos estratégicos e políticas públicas eficazes para alcançar resultados significativos. É preciso avançar na implementação de tecnologias sustentáveis, aproveitando a diversidade de abordagens disponíveis, para lidar com os desafios do descarte de resíduos e contribuir positivamente para a matriz energética nacional, garantindo simultaneamente a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento socioeconômico do país.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE, 2022, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>>. Acesso em 10 set. 2023.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações da Geração (BIG)**, 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NmM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9&pageName=ReportSection37e22ba757213eb30291>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BRANCO, M. **AVALIAÇÃO DO IMPACTE DA PRESENÇA DE SILOXANOS EM SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS**. Dissertação— Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010. Acesso em 26 maio. 2023.

BRASIL. [BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: **Presidente da República**, [2016]. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em 02 fev. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos**. [Brasília]: MMA, [2022b]. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>>. Acesso em 10 set. 2023.

BRASIL. Decreto 11.043, de 13 de abril de 2022. Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. [Brasília]: MMA, [2022a]. Disponível em: <[https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf)>. Acesso em 22 ago. 2023.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4ª Ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. Disponível em: [https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo\\_Municipal\\_2018.pdf](https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf). Acesso em: 12 Set. 2023.

COSTA, J. P. F. **TRATAMENTO MECÂNICO E BIOLÓGICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL PARA A RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS RECICLÁVEIS**. Ecologia Humana e Problemas Sociais Contemporâneos. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, out 2010. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/5816>. Acesso em 26 maio 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023**: Ano base 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. **Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de**

**energia elétrica no estado de Minas Gerais.** 2. Ed. Porto Alegre: ENGEBIO, 2010. Acesso 13 de nov. 2023.

**FIGUEIREDO, N. J. V. UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E ILUMINAÇÃO A GÁS – ESTUDO DE CASO.**

2007. Trabalho de Graduação Interdisciplinar apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/en.php>>. Acesso em maio 2023.

**FIRMO, A. L. B. Estudo Numérico e experimental da Geração de Biogás a Partir de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2013. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Julho, 2013.

**HENRIQUES, R. M. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM TECNOLÓGICA.** 2004. 190 p. Tese — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

**HOOGWIJK, M. et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. Biomass and Bioenergy,** v. 25, n. 2, p. 119-133, ago. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0961-9534\(02\)00191-5](https://doi.org/10.1016/s0961-9534(02)00191-5). Acesso em: 23 nov. 2023.

**MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; GANDOLLA, M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 2, p. 379-385, 20 jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016146475>. Acesso em: 26 maio 2023.

PAVAN, M. C. O. **GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: AVALIAÇÃO E DIRETRIZES PARA TECNOLOGIA POTENCIALMENTE APLICÁVEIS NO BRASIL.** 2010. 186 p. Tese — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

**SINIR+ | Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos.** Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/> . Acesso em: 22 nov. 2023.