

# RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO RIO GRANDE DO SUL: PANORAMA ATUAL E TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO

*Data de submissão: 16/10/2023*

*Data de aceite: 01/11/2023*

### **Rodrigo Ramos Medeiros**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS.  
São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/9060013379936356>

### **José Eduardo Angeli Reups**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS  
São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<https://lattes.cnpq.br/9701197802423566>

### **Luciana Hoffmann Teixeira**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS  
São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/5170693866424900>

### **Daniela Mueller de Lara**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS

São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/1557177056454917>

### **Suzana Frighetto Ferrarini**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS  
São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/8091675289256349>

### **Ana Carolina Tramontina**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Unidade Hortênsias, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade – PPGAS  
São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/5887389004235035>

**RESUMO:** Este artigo analisa a gestão dos resíduos sólidos urbanos no estado do Rio Grande do Sul, abordando a legislação vigente, a caracterização dos resíduos, o aumento na sua geração e as atuais práticas de destinação, com foco nos aterros sanitários. Além disso, explora os processos físico-químicos de degradação

nos aterros e discute alternativas de tratamento, como a geração de energia a partir de resíduos (Waste-to-Energy - WTE), incluindo exemplos de aproveitamento do biogás. Este estudo proporciona uma visão completa do panorama dos resíduos sólidos urbanos no estado, destacando desafios e oportunidades, e oferece insights valiosos para aprimorar a gestão desses resíduos, alinhando-se às diretrizes legais e explorando soluções mais sustentáveis. A análise dos processos de degradação e o enfoque em tecnologias inovadoras como a WTE refletem a busca por abordagens mais eficientes e ambientalmente responsáveis na gestão de resíduos sólidos urbanos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerenciamento de Resíduos, Sustentabilidade Urbana, Biogás, Destinação Ambientalmente Sustentável, Valorização Energética.

## URBAN SOLID WASTE IN RIO GRANDE DO SUL: CURRENT OVERVIEW AND TREATMENT TECHNOLOGIES

**ABSTRACT:** This article analyzes the management of solid urban waste in the state of Rio Grande do Sul, looking at current legislation, the characterization of waste, the increase in its generation and current disposal practices, with a focus on landfills. It also explores the physical and chemical degradation processes in landfills and discusses treatment alternatives, such as generating energy from waste (Waste-to-Energy - WTE), including examples of how biogas can be used. This study provides a complete overview of the urban solid waste landscape in the state, highlighting challenges and opportunities, and offers valuable insights for improving the management of this waste, aligning with legal guidelines and exploring more sustainable solutions. The analysis of degradation processes and the focus on innovative technologies such as WTE reflect the search for more efficient and environmentally responsible approaches to municipal solid waste management.

**KEYWORDS:** Waste Management, Urban Sustainability, Biogas, Environmentally Sustainable Disposal, Energy Recovery.

## INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), segundo a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são classificados como resíduos domiciliares, os quais são originados a partir de atividades domésticas em residências urbanas, e resíduos de limpeza urbana provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e demais serviços de limpeza urbana. A Lei Federal nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico, amplia essa definição para incluir também resíduos de atividades comerciais, industriais e de serviços, quando o gerenciamento não é de responsabilidade do gerador, sujeito à decisão do poder público.

O Brasil, com mais de 200 milhões de habitantes (IBGE, 2022), enfrenta um grande desafio, sendo um dos maiores produtores de RSU (ABRELPE, 2022). Apenas em 2019 foram geradas mais de 80 milhões de toneladas de resíduos (SINIR, 2019). Infelizmente, uma parte significativa desses resíduos é descartada inadequadamente, resultando em sérios problemas ambientais, especialmente quando despejados a céu aberto e/ou

queimados, como apontado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022).

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) possui mais de 10 milhões de habitantes (IBGE, 2022) e gerou 8,2 milhões de toneladas de resíduos sólidos domiciliares (RDO) e públicos (RPU) apenas no ano de 2020 (SNIS, 2021), destinando apenas 4,3% para a coleta seletiva (DMLU, 2022).

O aumento da produção de RSU está intimamente ligado ao crescimento populacional (SALAMONI, 2019) e a gestão eficiente desses resíduos é essencial para promover a sustentabilidade ambiental e a qualidade de vida (SANTOS, 2020). Além disso, segundo relatório do Painel Internacional de Recursos (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2019), a extração anual de matérias-primas está em ascensão, apresentando um aumento de mais de 300% entre 1970 e 2017, estimando-se ainda que esse volume deve dobrar até 2060, aumentando a pressão sobre os recursos naturais.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar um panorama atualizado dos RSU na região sul do Brasil, explorando as alternativas de tratamento, incluindo tecnologias de Waste-to-Energy (WTE), e discutindo as soluções disponíveis para lidar com esse desafio crescente.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Legislação aplicável aos resíduos sólidos

A legislação brasileira instituiu, através da Lei Federal nº 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que promove a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. A partir disso, não apenas o governo, como também produtores e consumidores finais, tornam-se responsáveis pela correta destinação e tratamento do seu material obsoleto. O Rio Grande do Sul, por sua vez, instituiu a Política Estadual de Resíduos Sólidos através da Lei Estadual nº 14.528/2014.

Em 2012, dois anos após a promulgação da PNRS, o Ministério do Meio Ambiente apresentou uma versão preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) (BRASIL, 2012). O PLANARES, após 10 anos de espera, foi instituído em 2022, pelo Decreto Federal nº 11.043, de 13 de abril, passando a ter validade em todo território nacional (BRASIL, 2022), como um conjunto de metas, estratégias, diretrizes e ações focadas na gestão de resíduos sólidos, fomentando a reciclagem no país.

Os Planos de Gestão de Resíduos Sólidos são instrumentos indispensáveis para o ordenamento local do setor gerador de resíduos, conforme previsto na legislação. São documentos que definem as diretrizes de gerenciamento de resíduos gerados em estabelecimentos, visando o controle e monitoramento de processos produtivos, com

objetivo de reduzir e evitar descartes inadequados, garantindo maior qualidade ambiental. No entanto, até o ano de 2015, somente 41% dos 5.570 municípios haviam elaborado seus Planos Municipais de Resíduos Sólidos (SINIR, 2016). Em 2018 esse número aumentou para 51%, segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), que verificou a maior tendência de presença do plano nos municípios mais populosos, variando de 49% nos municípios de 5 mil a 10 mil habitantes, para 83% nos municípios com mais de 500 mil habitantes (BRASIL, 2018).

## **Caracterização dos RSU no Rio Grande do Sul**

Um estudo realizado em 2010 pela Divisão de Destino Final (DDF) do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) de Porto Alegre, estabeleceu o poder calorífico inferior (PCI) médio do RSU gerado no município, como sendo 3.284 kcal/kg (PORTO ALEGRE, 2013). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a incineração dos RSU com poder calorífico inferior a 1.675 kcal/kg apresenta dificuldades técnicas e exige a adição de combustível auxiliar. Embora a classificação segundo o PCI não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação do RSU, considera-se que para um PCI menor que 1.675 kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável, enquanto para valores entre 1.675 kcal/kg e 2.000 kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico. Já, para um PCI maior que 2.000 kcal/kg, a queima bruta é tecnicamente viável (BRASIL, 2014).

A título de comparação, o PCI do carvão é de cerca de 6.000 kcal/kg e, do petróleo, cerca de 10.000 kcal/kg. Quanto maior o PCI de uma substância, mais energia pode ser liberada quando ela é queimada. Isso significa que substâncias com PCI mais elevados têm o potencial de gerar mais energia por unidade de massa ou volume quando usadas como combustível (MEHTA & THUMANN, 2021; GOSWAMI & KREITH, 2015).

Dois estudos avaliaram a composição gravimétrica dos resíduos gerados no município de Porto Alegre, em 2009 e 2010 (MEDEIROS et al., 2016), e a composição daqueles recebidos em um aterro sanitário do estado, onde são depositados os resíduos não apenas de Porto Alegre, como de município do seu entorno (MEDEIROS, 2023). Os dados estão apresentados na Figura 1 onde, pode se observar a similaridade dos dados.

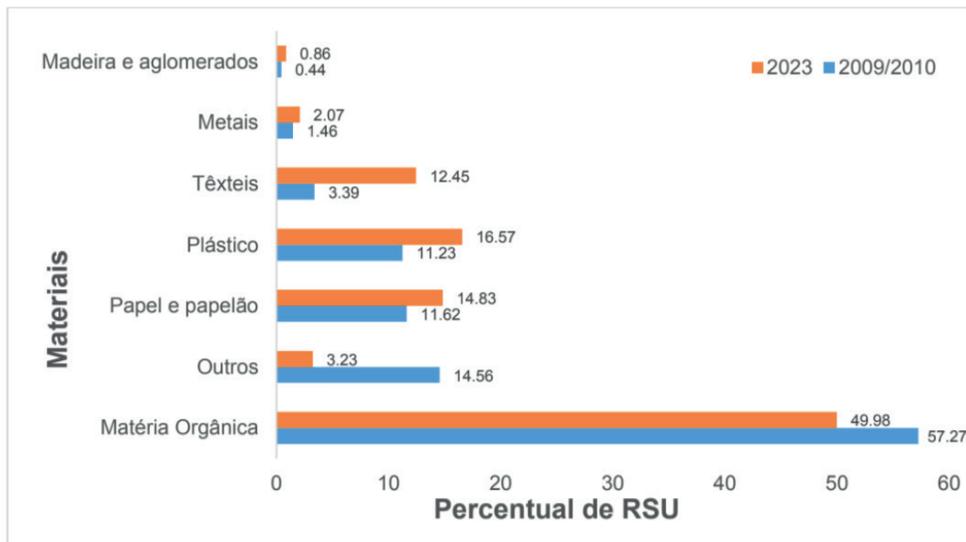


Figura 1 - Comparativo da composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos (RSU) na cidade de Porto Alegre (MEDEIROS et al., 2016) e em um aterro sanitário do estado do RS (MEDEIROS, 2023).

A presença de alta quantidade de matéria orgânica nos RSU é especialmente importante pelo seu potencial de geração de biogás, por meio de processos de digestão anaeróbica. O biogás é composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e pode ser usado como fonte de energia renovável para a produção de eletricidade e calor. O processo de geração e utilização do biogás será mais bem explanado posteriormente. No entanto, é importante ressaltar que o alto teor de matéria orgânica no RSU também pode tornar o gerenciamento desafiador, pois os resíduos orgânicos podem se decompor rapidamente, gerando odores desagradáveis e atraindo vetores (ROCHA DA CUNHA, 2009).

### Aumento da geração de RSU e seus impactos

A ABRELPE publica, desde 2003, o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. A partir da análise dos panoramas publicados em 2012 e 2022, foi possível observar que a geração *per capita* de RSU não apresenta alterações significativas. Em 2012, no Brasil, cada habitante gerava em média 383 kg de resíduo por ano e, em 2022, esse número chegou a 381 kg. Valores semelhantes também foram observados quando avaliados os dados obtidos para as coletas desses RSU, sendo de 348 kg/habitante/ano em 2012, passando para 354 kg/habitante/ano em 2022. Neste mesmo período, foi possível observar que a coleta evoluiu de 90,94% para 92,91%, um aumento de aproximadamente 2,00%.

Ao analisar separadamente as regiões do país, foi possível observar que a região Sudeste foi responsável pela geração de quase metade dos resíduos do país, um montante

de aproximadamente 40 milhões de toneladas apenas em 2022, fato esse atrelado a fatores como densidade populacional e estilo de vida. A região produz 1,234 kg/habitante/dia, se destacando pelos maiores índices de produção de RSU. Em contraponto, a região Sul se destaca por ser a menor produtora per capita dessa tipologia de resíduo, com um valor de 0,776 kg de resíduos gerados diariamente por habitante, o equivalente a aproximadamente pouco mais de 8,6 milhões de toneladas em 2022.

Para custeio de serviços associados a coleta, transporte, destinação final e serviços gerais de limpeza urbana, o Brasil aplicou em torno de 28 bilhões de reais em 2021, o que representa R\$ 10,95 por habitante/mês. Os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, somados, gastam cerca de R\$ 8,49 por habitante/mês (aproximadamente 3 bilhões por ano) em coleta de resíduos, tendo um índice de cobertura de coleta de RSU de 97%. Em contrapartida, os estados que compõem a região sudeste aplicam em torno de R\$ 14,21 por habitante/mês, apresentando um índice de cobertura de coleta de 98,60%, o percentual mais elevado do país. Entretanto, é importante ressaltar que os altos índices de coleta não garantem a correta destinação dos resíduos, tendo em vista que 39,5% de todo o RSU recebeu disposição final inadequada em 2021, e 39% em 2022, o que inclui destinação para lixões e aterros controlados, que seguem em operação em todas as regiões do país (ABRELPE, 2012 e 2022).

Conforme aponta o Índice de Sustentabilidade e Limpeza Urbana (2022), para a gestão eficiente de RSU é imprescindível que aconteça a universalização da coleta domiciliar e seletiva. A ausência de um serviço eficiente e abrangente interfere diretamente na vulnerabilidade da saúde pública, e admite que grande parte desses resíduos, que poderiam ser tratados e transformados em potenciais insumos, tenham destinação inadequada. Não obstante, outro fator negativo é o fato da redução da possibilidade de geração de renda e emprego na economia local, através da coleta e comercialização de materiais recicláveis.

Dados da ABRELPE (2022) sobre a tipologia da destinação final de RSU mostram que, em um cenário base, os aterros sanitários sem aproveitamento receberam, no ano de 2022, pouco mais de 42 milhões de toneladas, o que equivale a 55% do montante total. Os aterros sanitários com aproveitamento ou valorização de resíduos receberam pouco mais de 4 milhões de toneladas, o que equivale a 5,61% do total. Aterros controlados foram responsáveis por receber em torno de 17,3 milhões de toneladas e lixões por pouco mais de 12,3 milhões de toneladas, o que equivale, respectivamente, a 22,7% e 16,26% do montante total de resíduos gerados no ano em questão.

### **Destinação atualmente praticada: aterros sanitários**

A PNRS (2010) instituiu que os municípios devem dar o destino correto aos RSU gerados. Além disso, preconiza que sejam buscadas alternativas prévias ao depósito dos

RSU em aterros sanitários. É importante ressaltar que, embora o depósito de resíduos e rejeitos em aterros sanitários crie um passivo ambiental, a legislação indica essas instalações como “destinação final ambientalmente adequada”.

Os aterros sanitários são definidos pela ABNT (1992) como “técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”.

De acordo com painel do SINIR (que apresenta como dados mais atuais para o RS aqueles de 2019), 92% dos municípios do estado eram atendidos por aterro sanitário no período avaliado, apenas 1% era atendido por lixões, e 6% atendidos por aterros controlados (SINIR 2019). A série histórica ainda indica que o percentual de municípios em situação adequada no que tange à disposição final de resíduos passou de 55% em 2015 (275 municípios) para 86% (427 municípios) em 2019, indicando uma melhoria expressiva no indicador (SINIR, 2015 e 2019).

## Processos físico-químicos de degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários

Em aterros sanitários, a degradação da matéria orgânica passa por quatro fases de degradação, liberando, como produto final, os gases metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que são potenciais fontes de energia, embora ambos sejam gases de efeito estufa (ENSINAS, 2003, RICHA, KARANJEKAR *et al.*, 2015).

As fases de degradação da matéria orgânica em um aterro sanitário são delineadas em quatro etapas, de acordo com Crawford e Smith (1985). Alguns outros autores também classificam em uma quinta etapa (ROCHA DA CUNHA, 2009). A descrição dos processos principais que acontecem em cada uma das quatro fases pode ser observada a seguir e, também, visualizadas na Figura 2:

- **Fase I** - bactérias aeróbias consomem oxigênio e decompõem a fração orgânica do RSU em  $\text{CO}_2$ ;
- **Fase II** é anaeróbica, onde os compostos orgânicos produzidos são convertidos em ácidos;
- **Fase III**, bactérias anaeróbias convertem os ácidos orgânicos em compostos para as bactérias metanogênicas, que consomem o  $\text{CO}_2$  e o acetato;
- **Fase IV** é marcada por uma produção de biogás estável, geralmente por cerca de 20 anos após o descarte dos resíduos, embora o biogás continue a ser emitido por mais de 50 anos (ATSDR, 1998).

A duração da produção de biogás pode ser prolongada se houver uma quantidade significativa de fração orgânica no RSU.

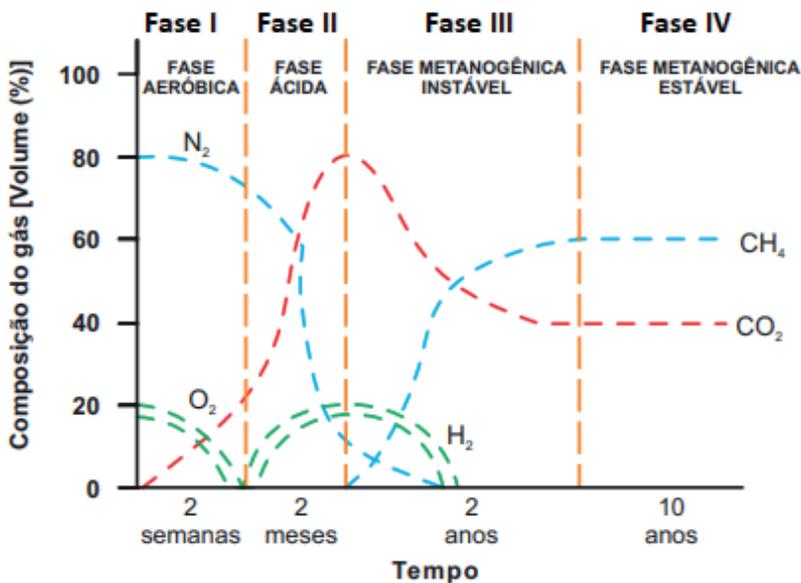


Figura 2. Fases de decomposição dos resíduos sólidos relacionada com a produção de gás em aterros sanitários variando com o tempo. Fonte: Adaptado de CASSINI, COELHO e PECORA, 2014.

## PROCESSOS DE GESTÃO DE RSU

Um dos grandes entraves para a reutilização dos resíduos é agregar valor a eles, fazendo com que o processo se torne viável economicamente. Para tal, é necessária a adoção de um conjunto de práticas que abordem desde o tratamento/separação de orgânicos, passando pela produção de biogás, até a reciclagem (GRISA e CAPANEMA, 2018).

Segundo estudo publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), o potencial de reaproveitamento e reciclagem dos RSU permeia de 30% a 40% do volume total, enquanto a estimativa é de que apenas 13% desses resíduos sejam devidamente encaminhados à reciclagem (IPEA, 2012). Em 2016, no Brasil, da totalidade de resíduos coletados, 29,60 milhões de toneladas foram destinadas inadequadamente em lixões ou aterros controlados e, 41,7 milhões de toneladas foram destinadas aos aterros sanitários que, mesmo sendo um destino adequado, tolera falta de etapas de tratamento, além de inviabilizar uma possível reciclagem (GRISA e CAPANEMA, 2018).

## Tecnologias voltadas ao tratamento de RSU

### Waste-to-Energy (WTE)

A transformação de resíduos em energia é mundialmente denominada pelo termo *waste-to-energy* (WTE), que, em tradução livre, significa “resíduos para energia”. As tecnologias associadas à conversão de resíduos em energia são utilizadas em diversos países, principalmente aqueles com pouco espaço territorial ou com fortes políticas de valorização do meio ambiente (WTERT, 2012).

Nos países europeus, principalmente nos mais desenvolvidos, grande parte do RSU é destinado à incineração. Por questões territoriais e ambientais, a destinação em aterros está sendo, cada vez mais, substituída pela destinação para plantas de incineração com produção de energia elétrica (EUROSTAT, 2015a e 2015b).

A produção de energia elétrica a partir de RSU cresceu significativamente na Europa nos últimos anos. Em alguns países, como Alemanha, Itália e Suécia, a geração mais do que dobrou em 10 anos de comparação. A produção total da Europa passou de 4,9 milhões de tonelada-equivalente de petróleo (tep) em 2003 para 8,8 milhões de tep em 2013. Considerando que 1 Megawatt-hora (MWh) equivale a 0,086 tep, a produção de energia elétrica a partir de RSU na Europa, em 2013, foi de aproximadamente 103 Terawatt-hora (TWh) (EUROSTAT (2015a e 2015b). Segundo Santos (2011), o motivo pelo aumento da incineração de RSU na Alemanha foi uma política interna rígida, com investimentos significativos no desenvolvimento de projetos com o objetivo de diminuir a utilização de aterros. Esses projetos incluem investimentos na coleta seletiva, reciclagem, incineração, recuperação energética e compostagem.

Assim como na Europa, a produção de energia elétrica a partir de RSU também cresceu nos EUA. Segundo Santos (2011), pelo menos metade dos estados dos Estados Unidos da América tinham entre uma ou duas plantas de incineração WTE em operação em 2008, consumindo 26 milhões de toneladas de RSU por ano e gerando cerca de 22,7 TWh de energia elétrica. A maior parte das plantas de incineração americanas, 80%, utilizam fornos de grelha para incinerar os RSU, por ser uma tecnologia simples e de baixo custo de instalação e operação. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), atualmente, existem 75 plantas de incineração de RSU nos EUA, localizadas em 25 estados, em sua maioria, no norte do país. Pouca coisa mudou desde 2008, nenhuma planta nova foi construída desde 1995, porém, as capacidades de utilização de resíduos e de produção de energia foram expandidas. Hoje, estas 75 incineradoras geram cerca de 23,8 TWh. Para produzir esta quantidade de energia são necessárias 28 milhões de toneladas de RSU, das quais, após a incineração, ainda sobraram 10% deste volume (EPA, 2023).

Além dos países da Europa e dos EUA, outros países também investem na incineração. No Japão, por exemplo, 100% dos RSU são incinerados. Em outros países asiáticos, como China, Índia, Coreia do Sul, Taiwan e Filipinas, as plantas de incineração estão sendo instaladas em grande número. Segundo dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos 2022, já há no país incineradores para resíduos industriais, de serviços de saúde (RSS) e de equipamentos que contenham Bifenilas Policloradas (PCB, comercializados com o nome de ascarel). A aplicação da incineração para os RSU ou CDR de RSU, ainda não foi identificada nenhuma atividade no país. Porém, está em fase de implantação uma Unidade de Recuperação Energética (URE) para tratamento térmico de RSU e CDR (Combustível Derivado de Resíduos), em Barueri/SP. A URE terá capacidade para tratar 825 toneladas/dia, com potência instalada de 20 MW de energia (BRASIL, 2022). Segundo dados constantes no site da própria empresa, entrará em operação em 2025 (URE BARUERI, 2023). Outras duas plantas de recuperação energética receberam licenças ambientais, uma em Mauá, em São Paulo, e outra no Caju, na cidade do Rio de Janeiro (BRASIL, 2022).

Após a coleta dos resíduos, separada por origem e tipo, o sistema de gerenciamento integrado deverá efetuar a recuperação ou valorização secundária dos materiais (através da reciclagem), o tratamento biológico da matéria orgânica (através da compostagem), o tratamento térmico (através da incineração) e a destinação final em aterros sanitários (Porto Alegre, 2013).

O potencial de produção de energia a partir de RSU se encontra, principalmente, nas duas últimas formas de destinação listadas, ou seja, através da queima dos resíduos em incineradores e através do gás de aterro gerado a partir da decomposição dos resíduos.

## Biogás

Conforme já citado na seção 2.5, os subprodutos da degradação da matéria orgânica no aterro sanitário são o lixiviado e o biogás. A geração e uso de biogás é um processo biológico que envolve a degradação de compostos orgânicos sob condições anaeróbias, resultando na produção desse combustível (GUWY, 2004). O biogás é composto principalmente pelos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  (CHRISTENSEN *et al.*, 2001; ZACHOW, 2000). O biogás pode ser produzido a partir de diversos resíduos orgânicos, como resíduo doméstico, resíduos agrícolas e lodo de esgoto, com composição variando entre 40% e 80% de  $\text{CH}_4$  (PECORA, 2006; GARCILASSO, 2012).

Para o aproveitamento energético desse combustível é preciso primeiro, prever a quantidade possível a ser gerada no aterro sanitário. Modelos matemáticos são utilizados para estimar a geração teórica de biogás mas, a previsão exata é difícil devido à influência de características próprias associadas aos resíduos, além das condições locais. Neste sentido, para utilizar estes modelos matemáticos teóricos é preciso inicialmente saber a caracterização do RSU recebido (MEDEIROS *et al.*, 2016)

Comparando diferentes modelos, Medeiros *et al.*, (2016) apresentaram um comparativo entre diversas metodologias para a previsão de geração de biogás e compararam com os dados de geração de um aterro. Neste estudo, a metodologia UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, ou United Nations Framework Convention on Climate Change) foi a que se aproximou mais da geração real de biogás.

Uma das unidades de recebimento de resíduos do Rio Grande do Sul, Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio (CRR), localizado em Minas do Leão, possui, desde 2015, uma unidade de geração de energia elétrica a partir da captura e aproveitamento do biogás obtido no local. A unidade geradora possui potência de 8,5 MWh, podendo atender em torno de 100 mil habitantes (ANDREAZZA, 2023). Com o sistema, a empresa chega a destruir até 98% do gás metano presente no biogás gerado no aterro, correspondendo a uma redução de emissão de 400 mil toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> por ano (CRVR, 2020).

## Processos Termoquímicos

Antes de serem destinados à disposição final, os RSU podem passar por tratamentos que agregam valor econômico ao aproveitar seu potencial energético e assim reduzir impactos ambientais já mencionados. Devido à considerável presença de matéria orgânica na composição dessas substâncias, os RSU têm potencial como fonte de energia e para a recuperação de produtos associados a eles. Conforme Belgiorno e colaboradores, (2002), o tratamento termoquímico dos RSU envolve a alteração das estruturas químicas sob altas temperaturas. Esse processo termoquímico pode ocorrer por meio de três vias principais: combustão, gaseificação e pirólise, cada uma com operações e produtos resultantes distintos.

A relevância dos processos termoquímicos no tratamento dos RSU, conforme destacado por Stantec (2011), é multifacetada. Esses processos reduzem o volume de resíduos gerados, minimizando conseqüentemente a demanda por áreas de disposição. Ao mesmo tempo, eles aproveitam o potencial energético dos resíduos, recuperam compostos químicos e minerais para reutilização em outras aplicações e contribuem para a mitigação de contaminantes presentes nos RSU que possam degradar o meio ambiente.

## Incineração e Combustão

Frequentemente empregada para tratar RSU, ocorre em temperaturas elevadas (700 °C a 1400 °C) e envolve a queima dos resíduos com excesso de oxigênio. Os principais produtos gerados nesse processo são o gás CO<sub>2</sub> e o vapor de água (vapor d'água) sendo amplamente utilizados para aquecimento e geração de eletricidade (BASU, 2010).

A utilização da queima controlada de RSU para a recuperação de energia é a abordagem mais promissora em termos de produção de eletricidade. Essa técnica envolve a captura do calor gerado durante a combustão para a produção de vapor, que, por sua vez, aciona uma turbina ligada a um gerador. O processo de geração de energia térmica a partir de RSU é essencialmente o mesmo que é empregado em usinas termelétricas convencionais, e sua capacidade de geração depende, em grande parte, do teor de calor dos materiais (MMA, 2022).

Atualmente, estão sendo conduzidos diversos estudos para avaliar a viabilidade da recuperação de energia a partir de RSU, empregando diversas tecnologias, incluindo a combustão. No entanto, há um debate acalorado em torno dos desafios associados à utilização de RSU como fonte de energia devido à falta de informações abrangentes sobre a composição dessas substâncias. Essa dificuldade é mais notável em países em desenvolvimento, onde a coleta inadequada de resíduos resulta na escassez de dados. Além disso, existem preocupações em relação aos custos e aos investimentos associados a essa abordagem, quando comparados às tecnologias já existentes (ANEEL, 2021).

No Japão, a usina termelétrica de ciclo a vapor, conforme descrita por Liu e colaboradores, (2020), possui capacidade para processar 170 toneladas de RSU por dia. O ciclo utiliza uma razão de ar de 1,2 e tem uma ampla faixa de Poder Calorífico Inferior (PCI), variando de 8.100 a 15.900 kJ/kg. Durante o processo, a vazão mássica do vapor atinge 10,8 kg/s, com uma pressão de 5 MPa e uma temperatura de 420°C. A potência gerada pela turbina é de 6.290 kW, e a eficiência do ciclo é de aproximadamente 20%.

Essa abordagem de geração de energia a partir de RSU apresenta várias vantagens, entre elas, a redução do volume de resíduos depositados em aterros, e, o controle de doenças relacionadas à contaminação desses locais. Além disso, a queima dos RSU ajuda a diminuir as emissões de carbono ao substituir o uso de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que reduz a produção de  $\text{CH}_4$  liberado na atmosfera a partir de aterros sanitários. Vale destacar que a energia térmica gerada durante a incineração dos resíduos, também é aproveitada para derreter neve nas estradas (LIU et al., 2020).

No entanto, esse processo de geração de energia a partir de RSU não está isento de desafios. A necessidade de aterros para o descarte das cinzas resultantes da incineração é um ponto a ser considerado, embora seja possível utilizar essas cinzas na produção de cimento. Além disso, as usinas de incineração de RSU envolvem um alto custo tanto em termos de construção quanto de operação, e o preço de venda da energia gerada a partir de RSU pode não cobrir adequadamente esses custos operacionais. Também há preocupações com possíveis riscos para a saúde humana associados à operação dessas usinas, e a quantidade mínima de resíduos necessária para que o processo seja viável pode entrar em conflito com práticas de redução, reutilização e reciclagem de resíduos (LIU et al., 2020).

No contexto de uma proposta de usina para o Brasil, o modelo em consideração é um ciclo combinado que integra o uso de gás natural e a incineração de RSU para geração de energia, conforme detalhado por Santi (2012). No ciclo a gás, o gás natural é utilizado como combustível, com um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 38.000 kJ/kg. A mistura de ar e gás natural tem uma razão de 2,14, e a temperatura de admissão do ar é de 25°C. A saída da turbina a gás atinge uma temperatura de 530°C, gerando uma potência de 40 MW. O combustor de RSU é parte integrante do sistema, com um PCI específico para RSU de 5.000 kJ/kg. A vazão mássica de RSU é de 7,2 toneladas por hora, enquanto a vazão mássica de ar é de 93,6 toneladas por hora, resultando em uma razão ar/combustível de 1,62. O ciclo combinado como um todo gera uma potência elétrica total de 57,6 MW, com uma eficiência térmica de 54,2%. Essa abordagem oferece várias vantagens, incluindo a prolongação da vida útil dos aterros, a recuperação de energia a partir dos RSU e a contribuição para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que, menos CO<sub>2</sub> é liberado durante a decomposição dos resíduos nos aterros. No entanto, também apresenta desvantagens, como a emissão de gases resultantes da combustão dos RSU, que podem representar riscos à saúde, e a necessidade de investir em tecnologias para o controle das emissões, o que pode acarretar custos adicionais (SANTI 2012).

## Gaseificação

A gaseificação de RSU é um processo termoquímico pelo qual se converte material carbonáceo na presença de uma quantidade reduzida de oxidante, inferior à quantidade estequiométrica, resultando na formação de um produto gasoso em altas temperaturas (YADAV E JAGADEVAN, 2019; LIU *et al.*, 2019). Esse produto gasoso é conhecido como gás de síntese ou syngas. Vale destacar que esse processo pode ser classificado como auto-térmico, no qual parte do combustível é queimado internamente para fornecer o calor necessário à gaseificação do material restante, ou como alotérmico, em que o calor é proveniente de uma fonte de calor externa.

A tecnologia de gaseificação abre caminhos inovadores para a utilização eficaz de RSU, transformando o que costumava ser um problema ambiental em um recurso ambiental e socialmente responsável. Essa abordagem permite a produção de biogás, eletricidade e calor, oferecendo diversas oportunidades comerciais (ABRELPE, 2015).

Embora atualmente existam 100 usinas de gaseificação de RSU em operação em todo o mundo, elas enfrentam desafios significativos, operando em condições sub-comerciais devido à complexidade da conversão de RSU. Isso se deve principalmente à considerável heterogeneidade desses resíduos (INTHARATHIRAT e SALAM, 2016). Segundo Matsakas e colaboradores (2017), a gaseificação envolve processos de conversão complexos e ainda está em fase de desenvolvimento técnico.

No Brasil, uma única iniciativa está em andamento na cidade de Boa Esperança, no estado de Minas Gerais, conduzida pela Furnas Centrais Elétricas (Furnas) como parte de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Segundo Menezes Neto (2018), este projeto de P&D, intitulado “Utilização de Energia e Geração de Eletricidade a partir de RSU por Meio de Reator Termoquímico” (Código ANEEL PD-0394-1602/2016), propõe o uso da tecnologia de gaseificação baseada em reator termoquímico de leito fluidizado circulante para gerar gás. Esse gás será posteriormente utilizado em uma caldeira para a queima e geração de vapor, acionando uma turbina no ciclo Rankine para gerar eletricidade.

## Pirólise

A pirólise é um processo realizado na ausência de oxigênio, e ocorre em temperaturas comparativamente mais baixas do que aquelas utilizadas na incineração, variando entre 250 °C e 700 °C, dependendo dos objetivos de produção. No processo, os produtos gerados são o carvão, o óleo pirolítico (ou bio óleo) e um gás composto por H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> (CHHITI; KEMIHA, 2013; STANTEC, 2011).

De acordo com Coser (2021), pirólise é definida como a degradação térmica de materiais orgânicos na ausência parcial ou total de um agente oxidante. Ainda, segundo o autor, para início do processo, se faz necessário a separação mecânica (pré-tratamento) dos resíduos, retirando os metais, vidros e materiais inertes. Após, através da aplicação de uma fonte externa de calor na câmara, ocorre o início da decomposição térmica dos materiais orgânicos a uma temperatura de aproximadamente 300°C, aumentando para 800°C com uma atmosfera não reativa (MOYA *et al.*, 2017).

Em 2019 a Fundação de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM-RS) concedeu licença de instalação para duas plantas para tratamento de resíduos por pirólise. Uma delas, localizada em Canoas, com autorização para promover pirólise de resíduos de Classe II, com volume total de 12 toneladas de resíduos por dia. A segunda, localizada em Farroupilha, com autorização para tratamento de resíduos Classe IIA, em um volume total de 600 toneladas por dia. Cabe ressaltar que, nenhuma delas recebeu licença de operação, e a segunda planta (Farroupilha) a empresa envolvida possui auto de infração emitido em 2023, por operar atividade poluidora sem licenciamento. Recentemente, em 2023, a FEPAM concedeu licença prévia para tratamento de até 5 toneladas de resíduos por dia, via pirólise, para a Universidade de Caxias do Sul (FEPAM, s.d.)

## CONCLUSÃO

O artigo abordou a problemática dos RSU no Estado do Rio Grande do Sul, contextualizando a situação atual, suas implicações ambientais e as possíveis abordagens para um gerenciamento mais eficiente. A partir das informações apresentadas, é possível destacar alguns pontos cruciais que serão elencados nos parágrafos seguintes.

O artigo ressalta que os RSU são um desafio crescente devido ao aumento populacional, crescimento econômico e padrões de consumo. A geração excessiva de resíduos contribui para impactos ambientais negativos, incluindo a destinação inadequada em aterros sanitários e a emissão de gases de efeito estufa.

O cenário de resíduos no Rio Grande do Sul espelha a situação nacional, com altos índices de geração e destinação inadequada, destacando a necessidade de abordagens sustentáveis. O Rio Grande do Sul enfrenta um desafio significativo no gerenciamento de RSU, com a demanda crescente por ações que promovam a redução, reutilização, reciclagem e a destinação ambientalmente correta.

A problemática dos RSU requer uma abordagem integral, envolvendo a participação ativa de órgãos governamentais, setor industrial, comunidades e cidadãos. A efetiva implementação das políticas públicas, incluindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a elaboração de Planos de Gestão de Resíduos Sólidos, juntamente com o estímulo à reciclagem, compostagem e valorização de resíduos, são etapas essenciais para promover a sustentabilidade ambiental e proteger a saúde pública.

Assim sendo, a gestão de resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul exige uma abordagem abrangente e comprometida, que abarque a aplicação rigorosa das políticas existentes, investimentos em tecnologias inovadoras e a promoção da conscientização da população. A busca por soluções sustentáveis e a adoção de práticas responsáveis beneficiarão não apenas o meio ambiente, mas também contribuirão para a melhoria da qualidade de vida das atuais e futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419 - Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: 1992.

ANDREAZZA, R. C. L. **A geração quali-quantitativa de metano através da disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado em Ambiente e Sustentabilidade. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul. 2023.

ANEEL. **I Seminário Desafios da Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos - 8/12/2021 - Parte 1**. 09 dez. 2021. 1 vídeo (2 h 57 min 04 s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dZk-fve7Qpk&t=62s>>. Acesso em: Set. 2023.

ATSDR, Agency for Toxic Substances Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. **Investigation of cancer incidences and residence near 38 landfills with soil gas migration conditions.** New York State. 1980-1989. Prepared by the New York State Department of Health. Division of Occupational Health and Environmental Epidemiology. Bureau of Environmental and Occupational Epidemiology. PB98-142144. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. (2015). **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.**

BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.** Burlington: Ed. Elsevier, 2010.

BELGIORNO, V. et al. **Energy from gasification of solid wastes.** Waste Management, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. ISSN 0956-053X.

BRASIL. (2012) Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos Versão Preliminar.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

BRASIL. (2014) Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 16/14- Estudo sobre a Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro. 2018.

BRASIL. (2014) Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 18/14 - Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** p 1-50. Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. (2018) Ministério do Meio Ambiente. Assessoria de Comunicação Social. **54% dos municípios têm plano de resíduos sólidos.**

BRASIL. (2019) Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos, 2019.** Dados atualizados em 10/08/2021.

BRASIL. (2022) Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares.** Coordenação de André Luiz Felisberto França. *et. al.* Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos [...].

BRASIL. **Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico [...].

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

CASSINI, S.T.; COELHO, S.T.; PECORA, V. **Biogás- Biocombustíveis ANP**. In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). *Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas*. C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1, p. 136-167.

CHHITI, Y.; KEMIHA, M., **Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review**. *The International Journal of Engineering AndScience*, v. 2, n.3 p. 75-85. 2013.

CHRISTENSEN T. H. et al. **Biogeochemistry of landfill leachate plumes**. *Applied Geochemistry*, v 16. n .7. 2001. 659 – 718p.

COSER, I. S. **Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando de Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC). 2021.

CRAWFORD. J.F.; SMITH. P.G. **Landfill Technology**. London: Butterworths. 1985.

CRVR – Central de Resíduos do Recreio. 2020. **Sistema de captura e queima controlada de biogás**. Disponível em: < <https://crvr.com.br/home/>>. Acesso em: Out. 2023.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA – DMLU. **Coleta Seletiva completa 32 anos na Capital recolhendo 45,6 toneladas de recicláveis por dia**. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/dmlu/noticias/coleta-seletiva-completa-32-anos-na-capital-recolhendo-456-toneladas-de-reciclaveis>>. Acesso em: Ago. 2023.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas–SP**. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Pós-Graduação na Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2003.

EPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW)**. 2023. Disponível em: <<https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>>. Acesso em: Set. 2023.

EUROSTAT, Statistical Office of the European Union. **Municipal Waste Generation and Treatment, by Type of Treatment Method**. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>. Acesso em: Jun. 2023.

EUROSTAT, Statistical Office of the European Union. **Primary Production of Renewable Energy by Type - Municipal Waste (Renewable)**. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>. Acesso em: Jun. 2023.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler. Licenciamento. Disponível em <http://ww3.fepam.rs.gov.br/licenciamento/Area1/default.asp> >. Acesso em: Out. 2023.

GARCILASSO, V. P.; GRISOLI, R. P. S.; CORTEZ, C. L.; POVEDA, M. M. R.; BRAUNE, A. V.; LIMA, A.; COELHO, S. T.; NOGUEIRA, A. R.; FERNANDES, L. E. D.; SILVA, G. A.; SCHOTT, A. K. E. B. S. **Comparação do desempenho ambiental de alternativas para a destinação de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético**. In: III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 2012, Maringá. *Anais do III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços*. 2012.

Goswami, D. Yogi; Kreith, Frank. **Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook (Mechanical and Aerospace Engineering Series)**. 2ª edição. CRC Press, 2015.

GRISA, D. C.; CAPANEMA, L. X. de L. **Resíduos sólidos** = Municipal solid waste. In: PUGA, F. P.; CASTRO, L. B. (Org.). *Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 415-438. 2018.

GUWY, A. J. **Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity, Reviews**. In: *Environmental Science and Bio/Technology*, v.3. n.2. 131–139p. 2004.

ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DA LIMPEZA URBANA - ISLU. **Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana** - edição 2022. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://selur.org.br/wp-content/uploads/2022/10/ISLU-2022a.pdf>>. Acesso em: Ago. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos de Logística Reversa Obrigatória**. Brasília, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Panorama Censo 2022**.

INTHARATHIRAT, R., & SALAM, P. A. (2016). **Valorization of MSW-to-energy in Thailand: status, challenges and prospects**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/281389925\\_ValORIZATION\\_of\\_MSW-to-Energy\\_in\\_Thailand\\_Status\\_Challenges\\_and\\_Prospects](https://www.researchgate.net/publication/281389925_ValORIZATION_of_MSW-to-Energy_in_Thailand_Status_Challenges_and_Prospects)>. Acesso em: Set. 2023.

KAUR, R. et al. **Thermochemical route for biohydrogen production**. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2019, 525 p.

LIU, Chen; NISHIYAMA, Toru; KAWAMOTO, Katsuya; SASAKI, So. **Waste to Energy Incineration. CCET guideline series on intermediate solid municipal waste treatment technologies**. 2020. Disponível em: <[https://ccet.jp/sites/default/files/2020-10/WtEI%20guideline\\_web\\_201014.pdf](https://ccet.jp/sites/default/files/2020-10/WtEI%20guideline_web_201014.pdf)>. Acesso em: Set. 2023.

Matsakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2017). **Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals**. *Electronic Journal of Biotechnology*, 26, 69-83.

MEDEIROS, Rodrigo Ramos. **DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO GERADO EM UM ESTADO**. In: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 6. 2023, Foz do Iguaçu. Vol. 6 (2023): 6o. Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade.

MEDEIROS, Rodrigo Ramos; WANDER, Paulo R.; MIRANDA, L.A.S. **Analysis of the Differences between Actual Data and USEPA, UNFCCC and IPCC Methodologies for Estimating Landfill Methane Generation Potential**. In: European Biomass Conference e Exhibition, 24. 2016, Amsterdam. Anais. Amsterdam, 2016.

Mehta, Paul; Thumann, Albert. **Handbook of Energy Engineering**. 8ª edição. River Publishers, 2021.

Menezes Neto, João Teles de. **Análise de viabilidade técnica e econômica da tecnologia de gaseificação como alternativa para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.

MOYA, Diego; ALDÁS, Clay; LÓPEZ, Germánico; KAPARAJU, Prasad.. **Municipal solid waste as a valuable renewable energy source: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To Energy Technologies**. Chania: Elsevier, 2017.

OLIVEIRA, Luciano Basto. **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2004.

PARADELA, Filipe Manuel Ramos. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos plásticos e de biomassa**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2007.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. 2006. 152p. Dissertação (Mestre em Energia). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (Lixo, Esgoto), Visando Incrementar o uso de Biogás como Fonte Alternativa de Energia Renovável**. São Paulo: 2010.

PORTO ALEGRE, Prefeitura Municipal de. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, Volume 1 – Diagnóstico e Prognóstico**. Porto Alegre: 2013.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – PNUMA. Painel Internacional de Recursos. **Extração e uso de recursos naturais aumentam mais do que crescimento populacional, alerta novo relatório da ONU**. 2019. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/press-release/extracao-e-uso-de-recursos-naturais-aumenta-mais-do-que>>. Acesso em: Ago. 2023.

ROCHA DA CUNHA, E. **Avaliação do Processo de Bioestabilização de Resíduos Sólidos Urbanos em Lisímetro de Campo**. 2009. 112p. 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

RICHA V. KARANJEKAR. ARPITABHATT. SAID ALTOUQUI. NEDAJANGIKHATOONABAD. VENNILADURAI. MELANIE L. SATTLER. M.D. SAHADAT HOSSAIN. VICTORIA CHEN. **Estimating CH<sub>4</sub> emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature and waste composition: The CLEEN model**. Journal Waste Management. Ed. 46. p. 389–398. 2015.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 14.528/2014**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos [...].

SALAMONI, G. P. D. **Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos devido aos processos de biodegradação em um aterro sanitário**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 2019.

SANTI, Alexandre. **Estudo da eficiência da geração de eletricidade a partir de gás natural e resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, A., Silva, B., & Oliveira, C. **Desafios e perspectivas para a gestão de resíduos sólidos urbanos na região sul do Brasil**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental, 14(3), 176-189. 2020.

SANTOS, Guilherme Garcia Dias. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Uso de Resíduos e Dejetos como Fonte de Energia Renovável**. Brasília: 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). **Planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos Brasil**: SINIR 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS – SINIR. **Resíduos Sólidos Urbanos**.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS – SINIR. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos 2019**. Dados atualizados em 10/08/2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS – SINIR. **Painel de Destinação de RSU, 2019**.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS – SINIR. **Painel de Destinação de RSU, 2015**

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico Temático, Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, Visão Geral ano de referência 2020**. Brasília, dezembro de 2021.

Stantec Consulting Ltd., **WASTE TO ENERGY: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report**. Burnaby, BC, 2011.

URE - UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA BARUERI. Disponível em: <https://urebarueri.com.br/>. Acesso em Out. 2023.

WTERT, Waste-to-Energy Research and Technology Council Brasil. **Geração de Energia Elétrica com Resíduos Sólidos Urbanos - Usinas “Waste-to-Energy” (WTE)**. Rio de Janeiro: 2012.

YADAV, K.; JAGADEVAN, S. **Influence of process parameters on synthesis of biochar by pyrolysis of biomass: an alternative source of energy**. In: IBRAHIM, H. A. Recent advances in pyrolysis. Intechopen, 2019. cap 3, 2019

ZACHOW, C. R. **Biogás**. Departamento de Tecnologia. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2000.