



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**MARIA GABRIELA OLIVEIRA DE PINHO**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS;**  
**UM ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA**

**FORTALEZA**

**2023**

MARIA GABRIELA OLIVEIRA DE PINHO

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS;  
UM ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- P724a Pinho, Maria Gabriela Oliveira de.  
Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos : um estudo de prospecção tecnológica / Maria Gabriela Oliveira de Pinho. – 2023.  
75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.
1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Aproveitamento energético. 3. Prospecção tecnológica. I. Título.  
CDD 660
-

MARIA GABRIELA OLIVEIRA DE PINHO

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS;  
UM ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Ari Clecius Alves de Lima  
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Estado do Ceará (NUTEC)

À Deus por tornar possível a realização deste sonho e à minha família e amigos, pois ao longo de um percurso repleto de desafios e incertezas, eles me apoiaram de forma inestimável para alcançar essa conquista. Minha sincera gratidão por tudo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por estar presente em minha vida, orientando minhas escolhas e proporcionando conforto nos momentos desafiadores.

Aos meus queridos pais, Wesleyandra e Expedido, e meus irmãos Gabriel e Graziela, que sempre me deram suporte e força para buscar meus objetivos, celebrando cada vitória ao meu lado. Concluir essa etapa da minha vida não seria possível sem o suporte de vocês.

À minha família e amigos de São Benedito, por todo apoio e amor que recebo. Obrigada por sempre compreenderem minha ausência e mesmo de longe sempre me enviarem apoio e incentivo.

Ao meu namorado, Nestor, que mesmo sem entender nada de engenharia química, sempre esteve ao lado oferecendo ajuda e me incentivando a enfrentar os desafios. Obrigada pelos momentos de apoio, paciência e encorajamento.

Aos meus amigos do Boteco do C++, por me acompanharem durante todos esses anos de graduação. A faculdade de engenharia química não é fácil, mas se tornou mais feliz e divertida com vocês ao meu lado.

Aos meus colegas de trabalho na Ambev, por tornarem a rotina mais leve, preocupando-se com meu bem estar e oferecendo palavras incentivadoras.

Ao Prof. Dr. João José Hiluy Filho, pela excelente orientação, dedicação e suporte ao longo da construção desse trabalho.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves e Dr. Ari Clecius Alves de Lima pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Agradeço também a todos aqueles que, por questão de extensão, não foram citados nesse trabalho, mas que colaboraram direta e/ou indiretamente para a concretização dessa etapa da minha vida.

*"Se pude enxergar mais longe,  
foi porque me apoiei em ombros de gigantes."*

ISAAC NEWTON

## RESUMO

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um desafio contemporâneo, uma vez que muitas atividades humanas geram resíduos, frequentemente descartados de maneira inadequada. Antes da disposição final desses resíduos em aterros sanitários, é possível realizar tratamentos, incluindo a recuperação energética. Este trabalho tem como objetivo conduzir um estudo de prospecção tecnológica sobre o aproveitamento energético de RSU, empregando a prospecção tecnológica para mapear desenvolvimentos tecnológicos e fornecer insights para o planejamento e tomada de decisões nesse setor. A metodologia adotada envolve a análise de artigos científicos e patentes em diversos níveis. A avaliação desses documentos incorpora parâmetros como ano de publicação, país de origem, tipo de autor e foco do conteúdo. Este enfoque busca fornecer uma compreensão abrangente das tendências e avanços no campo. Os dados obtidos no estudo revelam um crescente interesse na área ao longo dos anos, além de evidente participação global, com diversos países contribuindo para construção do conhecimento, especialmente a China. Nesse contexto, o Brasil se apresenta como um país em estágio inicial no desenvolvimento de pesquisas e aplicação das tecnologias, mas com adoção de práticas cada vez mais alinhadas ao aproveitamento energético dos resíduos. Através dos resultados, identificou-se que o cenário do aproveitamento energético de RSU é dinâmico, diversificado e repleto de desafios e oportunidades.

**Palavras-chave:** *resíduos sólidos urbanos; aproveitamento energético; prospecção tecnológica.*

## ABSTRACT

The management of municipal solid waste (MSW) represents a contemporary challenge, given that many human activities generate waste, often improperly disposed of. Before the final disposal of this waste in landfills, various treatments, including energy recovery, can be applied. This work aims to conduct a technological foresight study on the energy recovery of MSW, employing technological foresight to map technological developments and provide insights for planning and decision-making in this sector. The adopted methodology involves the analysis of scientific articles and patents at various levels. The evaluation of these documents incorporates parameters such as the year of publication, country of origin, type of author, and content focus. This approach seeks to provide a comprehensive understanding of trends and advancements in the field. The study data reveal that over the years interest in the area has grown, in addition to evident global participation, such as the contribution of different countries to the construction of knowledge, especially China. In this context, Brazil emerges as a country in the early stages of research development and technology application but with an increasing alignment with energy recovery practices from waste. Through the results, it was identified that the scenario of MSW energy recovery is dynamic, diversified, and filled with challenges and opportunities.

**Keywords:** *urban solid waste; waste-to-energy; technological foresight.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição e tratamento de RSU de 2011-2017, por países selecionados .....	7
Figura 2 – Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil .....	8
Figura 3 – Situação dos resíduos p densidade demográfica e nível de renda do país .....	9
Figura 4 – Ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos .....	11
Figura 5 – Representação ilustrativa dos lixões .....	19
Figura 6 – Representação ilustrativa dos aterros controlados .....	19
Figura 7 – Representação ilustrativa dos aterros sanitários .....	20
Figura 8 – Ilustração de uma usina de incineração com aproveitamento energético .....	24
Figura 9 – Principais tipos de sistemas de compostagem .....	27
Figura 10 – Fluxograma da digestão anaeróbica .....	29
Figura 11 – Diferenças entre incineração, gaseificação e pirólise .....	30
Figura 12 – Tecnologias de aproveitamento energético de RSU .....	31
Figura 13 – Detalhamento das análises de prospecção tecnológica nesse trabalho .....	33
Figura 14 – Seções da Classificação Internacional de Patentes .....	35
Figura 15 – Exemplo de símbolo completo da IPC .....	35
Figura 16 – Primeira estratégia utilizada na pesquisa de artigos científicos .....	38
Figura 17 – Segunda estratégia utilizada na pesquisa de artigos científicos .....	39
Figura 18 – Estratégia utilizada na pesquisa de patentes .....	40

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Soluções e práticas de afastamento de resíduos domiciliares no Brasil, em 2018 .....	5
Gráfico 2	– Evolução da situação de disposição inadequada no Brasil .....	10
Gráfico 3	– Estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil .....	16
Gráfico 4	– Evolução da cura do composto.....	26
Gráfico 5	– Número de artigos científicos publicados por ano .....	41
Gráfico 6	– Número de artigos científicos publicados por país com 5 ou mais publicações .....	43
Gráfico 7	– Número e % de artigos científicos publicados por continente .....	44
Gráfico 8	– Número de artigos científicos publicados por autor com 5 ou mais publicações .....	45
Gráfico 9	– Quantidade de autores por número de artigos científicos publicados .....	46
Gráfico 10	– Número de artigos científicos publicados por área de pesquisa com 10 ou mais publicações .....	47
Gráfico 11	– Número de artigos científicos publicados por principais taxonomias .....	48
Gráfico 12	– Número de patentes depositadas por ano .....	49
Gráfico 13	– Número de patentes depositadas por idioma .....	50
Gráfico 14	– Número e % de patentes depositadas por tipo de invenção .....	51
Gráfico 15	– Número e % de patentes depositadas por titularidade .....	52
Gráfico 16	– Número e % de patentes depositadas por tipo de depositante .....	52
Gráfico 17	– Número de patentes depositadas por tipo de tecnologia .....	53
Gráfico 18	– Número de patentes depositadas por Classificação Internacional de Patentes .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil, em 2022 .....	09
Tabela 2 – Responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo de resíduo .....	15
Tabela 3 – Destinação final em massa de RSU projetada para 2040, sem materiais recicláveis .....	18
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens do projeto de aterro sanitário com captura de gás .....	22
Tabela 5 – Vantagens e desvantagens do processo de incineração .....	24
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do processo de compostagem .....	28

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	2
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i> .....	3
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>2.1</b>	<b>Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)</b> .....	4
2.1.1	<i>Contexto Nacional e Mundial</i> .....	5
2.1.2	<i>Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS)</i> .....	10
2.1.3	<i>Classificação e Caracterização dos Resíduos Sólidos</i> .....	12
<b>2.2</b>	<b>Aproveitamento Energético de RSU</b> .....	17
2.2.1	<i>Aterro com Captura de Gás</i> .....	18
2.2.2	<i>Incineração</i> .....	22
2.2.3	<i>Compostagem</i> .....	25
2.2.4	<i>Outras Tecnologias</i> .....	28
<b>2.3</b>	<b>Prospecção Tecnológica</b> .....	32
2.3.1	<i>Análise de Artigos Científicos e Patentes</i> .....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	37
<b>3.1</b>	<b>Monitoramento Tecnológico de Artigos</b> .....	37
<b>3.2</b>	<b>Monitoramento Tecnológico de Patentes</b> .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
<b>4.1</b>	<b>Monitoramento Tecnológico de Artigos</b> .....	41
4.1.1	<i>Análise Macro</i> .....	41
4.1.2	<i>Análise Meso</i> .....	45
4.1.3	<i>Análise Micro</i> .....	47
<b>4.2</b>	<b>Monitoramento Tecnológico de Patentes</b> .....	49
4.2.1	<i>Análise Macro</i> .....	49
4.2.2	<i>Análise Meso</i> .....	51
4.2.3	<i>Análise Micro</i> .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos verificou-se um aumento significativo na migração da população de regiões rurais para áreas urbanas, combinado ao crescimento exponencial da população global. Esse fenômeno tem gerado um dos principais desafios da atualidade: a gestão de resíduos. Desde o início século XXI, a humanidade vem sendo rotulada como a sociedade dos resíduos, onde o desperdício e um estilo de vida baseado em um consumo excessivo predominam. Os impactos ambientais resultantes da gestão inadequada dos resíduos são cada vez mais evidentes e têm sérias consequências, tais como a poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Somado a isso, tem-se enfrentado os efeitos do acúmulo inadequado de resíduos que contribuem para a disseminação de organismos patogênicos e vetores de doenças, com graves consequências para a saúde pública.

No Brasil, a preocupação com a gestão dos resíduos ficou ainda mais eminente após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, que, entre outros, define e hierarquiza as destinações ambientalmente adequadas a serem aplicadas aos resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2010). A disposição final é uma das alternativas de destinação previstas na PNRS. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), no país, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda representam 39% da disposição total dos resíduos coletados.

Paralelamente, o Brasil também vem enfrentando problemas no fornecimento de eletricidade. Segundo Tolmasquim (2000), entre 1990 e 2000 o consumo de energia elétrica cresceu 49% enquanto a capacidade instalada foi expandida em apenas 35%. Nos últimos anos o país vivenciou algumas crises energéticas, como as crises de 2001, 2014 e 2021. Esse fato é recorrente e tem a crise hídrica como principal causadora, visto que a matriz elétrica nacional é predominantemente hidráulica, representando 61,9% do total (EPE, 2023). Se o país não teve de racionar antes, foi porque utilizou, no passado recente, água guardada para ser consumida hoje; com o uso das reservas, os riscos de déficit de energia foram aumentando (TOLMASQUIM, 2000).

Nesse cenário, as tecnologias de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, também conhecidas como *waste-to-energy* (WTE), surgem como uma alternativa que pode contribuir tanto no contexto da gestão dos resíduos como para o setor energético brasileiro.

Essa abordagem envolve a aplicação de métodos de recuperação de energia, tais como incineração e digestão anaeróbica. Essas tecnologias desempenham um papel fundamental na redução do volume de resíduos sólidos, ao mesmo tempo em que transformam os materiais em fontes de energia elétrica e subprodutos úteis.

Nesse contexto, como a prospecção tecnológica contribui para a análise das tecnologias de aproveitamento energético de RSU? Atualmente, a velocidade com que as pesquisas e técnicas evoluem torna a competitividade e a celeridade na apresentação de estratégias inovadoras essenciais para a tomada de decisão e diferenciação de empresas e governos. Essa realidade também se aplica às tecnologias WTE, onde se faz necessário conhecer o estado das pesquisas e patentes a fim de contribuir para a escolha assertiva de investimentos futuros, seja no aprimoramento de técnicas, apoio às instituições de pesquisa ou realização de novos estudos. A prática de prospecção tecnológica possibilita a compreensão das tendências e o início do desenvolvimento de novos produtos e processos com base em tecnologias já existentes, ampliando a capacidade de avançar em direção a uma visão estrategicamente planejada para atingir o desenvolvimento sustentável (SILVA *et al.*, 2015).

Esse estudo ganha relevância ao oferecer uma análise das WTE, influenciando de maneira direta o desenvolvimento futuro do aproveitamento energético dos RSU por meio do diagnóstico dos métodos atualmente empregados. Dessa forma, a prospecção tecnológica se apresenta como uma ferramenta para acelerar o processo de inovação das WTE, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e ampliação da matriz energética brasileira.

Nesse cenário, o propósito do presente estudo é conduzir uma análise de prospecção tecnológica em relação à utilização de resíduos sólidos urbanos como fonte de energia. De maneira mais precisa, os objetivos incluem a compreensão do panorama dos RSU e da metodologia de prospecção tecnológica, uma revisão da literatura a respeito das tecnologias de aproveitamento energético de RSU, um levantamento de artigos científicos e patentes relacionados à geração de energia a partir de RSU nas bases de dados correspondentes, e a avaliação do cenário dessas tecnologias por meio de análises de prospecção tecnológica.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo de prospecção tecnológica acerca do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU).

### ***1.1.1 Objetivos Específicos***

Para garantir a realização do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- a) compreender o contexto dos RSU e a metodologia de prospecção tecnológica;
- b) realizar uma revisão da literatura sobre as tecnologias de aproveitamento energético de RSU;
- c) fazer um levantamento de artigos científicos e patentes sobre a geração de energia a partir do RSU nas bases de dados correspondentes;
- d) avaliar o cenário das tecnologias através das análises de prospecção tecnológica.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

Os tópicos deste estudo estão divididos em cinco capítulos seguidos das referências. O capítulo 1 detalha a introdução e os objetivos geral e específicos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, que se subdivide nos temas: Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento Energético de RSU e Prospecção Tecnológica, trazendo o embasamento necessário para entendimento do assunto. No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no levantamento dos artigos e patentes. O capítulo 4 está relacionado com os resultados e análises obtidos através da prospecção tecnológica. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, além de sugestões para estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são resultantes das atividades humanas e capazes de gerar impacto adverso ao ambiente. Estima-se que a massa de RSU coletada no Brasil em 2021 foi de 65,6 milhões de toneladas, aproximadamente 179,8 mil toneladas por dia, sendo 0,99 kg/habitante a massa diária média per capita de RSU coletada em relação à população urbana e 0,95 kg/habitante em relação à população total (SNIS, 2022).

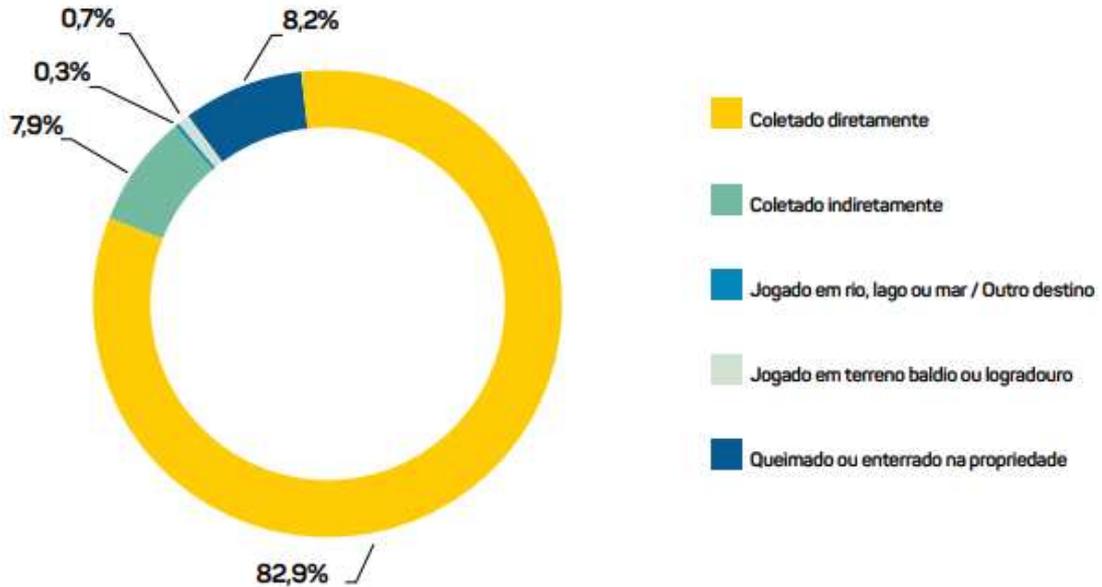
A Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e apresenta algumas definições. De acordo com Brasil (2010), os resíduos sólidos podem ser descritos como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

No contexto atual de fabricação de bens de consumo, prevê-se um aumento na produção de RSU em todo o mundo. Segundo a *International Solid Waste Association (ISWA)*, Associação Internacional de Resíduos Sólidos, em 2016, esse total era de 2 bilhões de toneladas por ano, e a projeção é que alcance 3,4 bilhões de toneladas até 2050, sendo a maior parcela desse aumento registrada em nações de baixa renda, onde a produção de resíduos deve triplicar (ISWA, 2022).

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), dados de 2018 mostraram que 82,9% dos domicílios brasileiros foram atendidos por coleta direta dos resíduos sólidos domiciliares; 7,9% dos domicílios foram atendidos por coleta indireta e os demais domicílios não foram atendidos por serviço de coleta regular, conforme Gráfico 1 (PLANARES, 2022). Os dados evidenciam que uma parcela significativa dos resíduos ainda é disposta em locais inadequados, representando uma ameaça direta ao meio ambiente, à biodiversidade e à saúde humana.

Gráfico 1 – Soluções e práticas de afastamento de resíduos domiciliares no Brasil, em 2018



Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

Concomitante a isso, o aumento na produção de resíduos sólidos urbanos tem levado à uma redução da vida útil dos aterros sanitários, resultando em impactos ambientais mais significativos. Assim, destaca-se a necessidade urgente de investir em novas tecnologias que forneçam um sistema apropriado para o tratamento dos resíduos, formulando uma gestão que garanta a contínua melhoria da qualidade de vida, promova práticas de saúde pública e resguarde o meio ambiente.

### 2.1.1 Contexto Nacional e Mundial

Segundo Simões *et al.* (2019), a adoção de políticas e legislações mais rígidas tem impulsionado países desenvolvidos, especialmente na Europa, a avançarem significativamente nas últimas duas décadas no tratamento e na disposição de resíduos sólidos. Essas medidas têm estimulado o progresso e a adoção de tecnologias inovadoras, resultando em uma notável melhora na gestão de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com informações do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), a gestão adequada de resíduos sólidos, seja por meio de aterros controlados ou instalações que empregam tecnologias avançadas, é predominantemente observada em nações de renda elevada e média-alta. Em contrapartida, países de baixa renda apresentam uma preocupante realidade, com cerca de 93% dos resíduos sendo despejados em lixões a céu aberto, enquanto a parcela se reduz para apenas 2% em nações de renda alta (INPI, 2022).

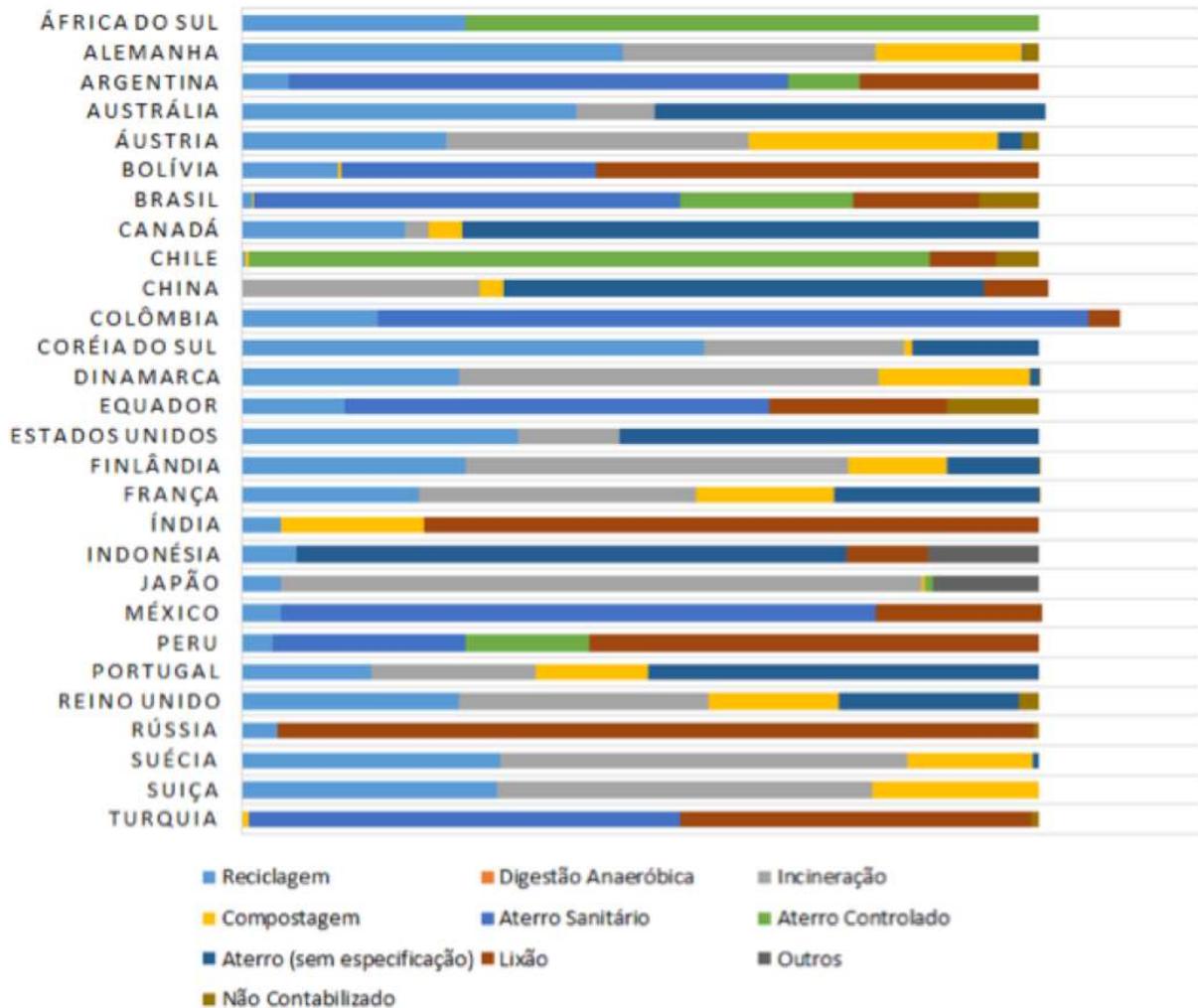
Ainda no âmbito internacional se observa uma crescente adoção de abordagens que visam promover a economia circular, com o objetivo de eliminar a prática linear da disposição final. Além disso, tem-se notado um significativo progresso na reciclagem de materiais e nutrientes por meio de iniciativas de coleta seletiva, principalmente em nações mais desenvolvidas (PLANARES, 2022).

O manejo inapropriado dos resíduos sólidos acarreta consequências prejudiciais ao meio ambiente, à saúde coletiva e à economia. Para lidar com essas preocupações, países mais desenvolvidos têm implementado estratégias e tecnologias de vanguarda para enfrentar o desafio dos RSU. Isso inclui a compostagem anaeróbica de resíduos orgânicos, bem como o uso de tecnologias de tratamento térmico dos resíduos, como incineração, gaseificação e pirólise (BELCHIOR, 2019).

Nos países da União Europeia, à medida que a gestão de resíduos sólidos urbanos avança, é evidente uma tendência de redução da disposição desses resíduos em aterros sanitários. Entre 1995 e 2012, a quantidade de resíduos encaminhados para aterros diminuiu em 42% em peso. Em contrapartida, houve um aumento expressivo de 80% no volume de resíduos destinados à incineração no mesmo período. Tal expressividade também é notada na reciclagem e nos tratamentos biológicos, com crescimentos de 162% e 149%, respectivamente (MANNARINO *et al.*, 2016). De acordo com Schalch *et al.* (2002), o êxito obtido em países como Dinamarca, França, Holanda e Japão na gestão e no tratamento de resíduos sólidos é resultado de um planejamento eficaz, atribuições bem definidas para cada agente envolvido e acesso contínuo à informação em todas as fases do processo de planejamento.

Conforme Szigethy e Antenor (2020), na Alemanha, medidas como a proibição do envio de resíduos não tratados para aterros e a promoção da economia circular resultaram em 13% dos produtos da indústria feitos com materiais reciclados, empregando mais de 250 mil pessoas na gestão de resíduos. No Japão, coleta seletiva e reciclagem incentivadas por lei levaram à produção de garrafas PET com material reciclado, reduzindo o uso de novos plásticos e emissões de dióxido de carbono. Em Estocolmo (Suécia), 100% dos domicílios possuem coleta seletiva com um sistema de lixeiras conectadas a uma rede subterrânea que separa e compacta os resíduos. Em San Francisco (EUA), programas de reciclagem e compostagem com incentivos econômicos resultaram na redução de 12% nas emissões de gases de efeito estufa. Na Figura 1 é apresentado como alguns países realizam a disposição e o tratamento de RSU, com dados coletados entre 2011 e 2017.

Figura 1 – Disposição e tratamento de RSU de 2011-2017, por países selecionados \*\*\*



Fonte: Szigethy e Antenor (2020).

\* Utilizou-se uma variedade de fontes de informação e bancos de dados que abrangem o período de 2011 a 2017.

\*\* Países adotam diferentes metodologias para medir a gestão de seus resíduos, o que pode resultar em divergências, como a contagem duplicada de resíduos em relação aos tratamentos mencionados.

\*\*\* Outros geralmente se refere a queima inapropriada de resíduos ou despejo não contabilizado.

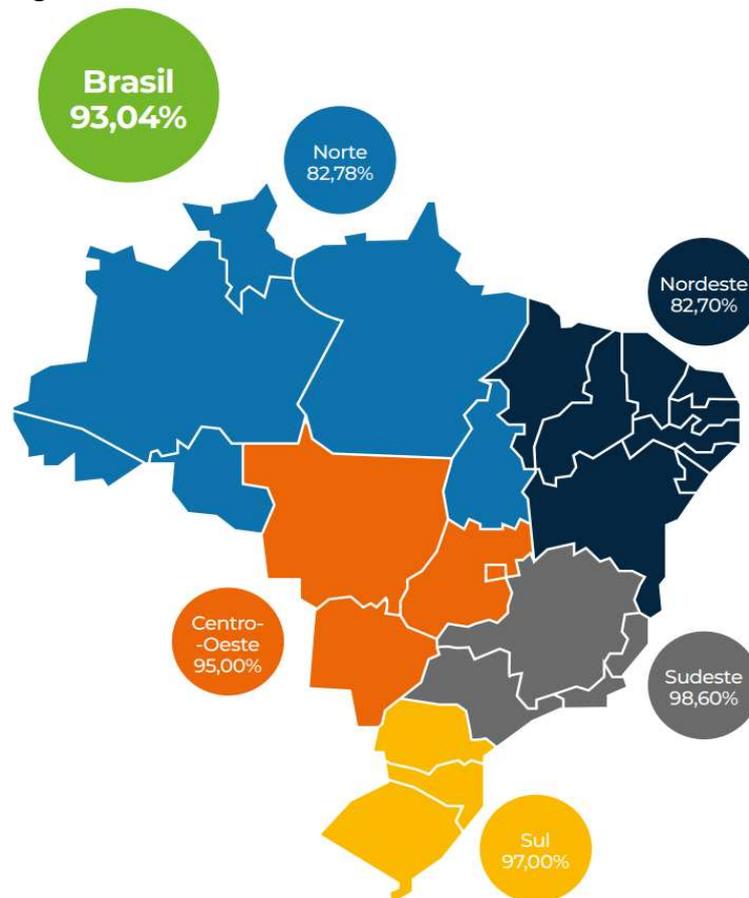
Nas últimas décadas, o Brasil tem visto iniciativas institucionais surgirem com o objetivo de aprimorar a gestão e as concepções relacionadas aos resíduos sólidos, abrangendo também seu tratamento. Um desses esforços notáveis é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que atribui a responsabilidade pela gestão dos resíduos à sociedade e aos municípios, integrando-se ao plano de saneamento e tendo como base legal as políticas públicas nacionais (BRASIL, 2010).

Segundo Santos *et al.* (2018), o Brasil adota um modelo de gestão de RSU em conformidade com países desenvolvidos, como os da União Europeia e os Estados Unidos da América (EUA). Esse modelo baseia-se em um princípio central, estabelecido no artigo 9º da PNRS, que prioriza a disposição final ambientalmente adequada exclusivamente para rejeitos, ou seja, resíduos para os quais as perspectivas de tratamento e recuperação se esgotaram.

Ao contrário dos países desenvolvidos, no Brasil o uso de aterros controlados e lixões como opções para a destinação final de RSU ainda é uma prática comum. Essa conduta está diretamente associada à impactos ambientais que representam riscos para a saúde e o bem-estar social.

Em 2022, foram produzidos aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU no Brasil, correspondendo a 224 mil toneladas diárias e, em média, 1,04 kg de resíduos por dia. No que diz respeito à coleta de RSU, no mesmo ano, o país contabilizou um volume total de 76,1 milhões de toneladas coletadas, resultando em uma taxa de cobertura de coleta de 93%. Conforme Figura 2, as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste apresentaram índices de cobertura de coleta superiores à média nacional. Entretanto, as regiões Norte e Nordeste registraram índices que se aproximam de 83%, o que significa que uma considerável parcela da população nessas áreas ainda não tem acesso aos serviços regulares de coleta de RSU (ABRELPE, 2022).

Figura 2 – Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2022).

Conforme Tabela 1, áreas de disposição inadequada, que englobam lixões e aterros controlados, ainda estão em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do

total de resíduos coletados. Isso equivale a um volume total de 29,7 milhões de toneladas de resíduos com destinação inadequada (ABRELPE, 2022).

Tabela 1 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil, em 2022

Região	Disposição Adequada		Disposição Inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.870.470	36,6%	3.240.105	63,4%
Nordeste	6.214.527	37,2%	10.491.191	62,8%
Centro-Oeste	2.532.762	43,5%	3.288.281	56,5%
Sudeste	29.773.638	74,3%	10.298.552	25,7%
Sul	6.020.694	71,6%	2.388.097	28,4%
<b>Brasil</b>	<b>46.412.091</b>	<b>61,0%</b>	<b>29.706.226</b>	<b>39,0%</b>

Fonte: ABRELPE (2022).

Em função das suas disparidades regionais, o Brasil apresenta perfis diversos quanto à disposição final dos resíduos, tendo um pouco de cada uma das situações ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Situação dos resíduos com base na densidade demográfica e nível de renda do país

<p><b>Densidade demográfica: Alta</b> <b>Nível de renda: Alto</b></p> <p><b>Exemplos:</b> Japão, Alemanha, Bélgica, costa leste dos EUA</p> <p><b>Característica do lixo:</b> Alta geração <i>per capita</i>. Alto teor de embalagens.</p> <p><b>Gestão do lixo:</b> Coleta total do lixo, com foco em programa de gestão seletiva. Incineração usada para gerar energia. Aterro sanitário, com controles ambientais, como forma de destinação final.</p>	<p><b>Densidade demográfica: Baixa</b> <b>Nível de renda: Alto</b></p> <p><b>Exemplos:</b> Canadá, países nórdicos, interior dos EUA</p> <p><b>Característica do lixo:</b> Alta geração <i>per capita</i>. Alto teor de embalagens e com grande parcela de resíduos de jardinagem.</p> <p><b>Gestão do lixo:</b> Coleta total do lixo. Aterro sanitário como principal forma de destinação. Algumas iniciativas de reciclagem, dependendo da região. Compostagem de resíduos orgânicos.</p>
<p><b>Densidade demográfica: Alta</b> <b>Nível de renda: Baixo</b></p> <p><b>Exemplos:</b> Cidades na Índia, China, Egito</p> <p><b>Característica do lixo:</b> Média geração <i>per capita</i>, teor médio de embalagens e alto teor de restos de alimentos.</p> <p><b>Gestão do lixo:</b> Coleta inadequada do lixo. Crescente preocupação em fechar lixões e criar aterros sanitários com controles ambientais. Indústrias de reciclagem abastecidas por catadores trabalhando nas ruas e nos lixões.</p>	<p><b>Densidade demográfica: Baixa</b> <b>Nível de renda: Baixo</b></p> <p><b>Exemplos:</b> Áreas rurais da África e de algumas regiões da América Latina</p> <p><b>Característica do lixo:</b> Baixa geração <i>per capita</i>. Alto teor de restos de alimentos.</p> <p><b>Gestão do lixo:</b> Coleta inadequada do lixo. Lixão como principal forma de destinação.</p>

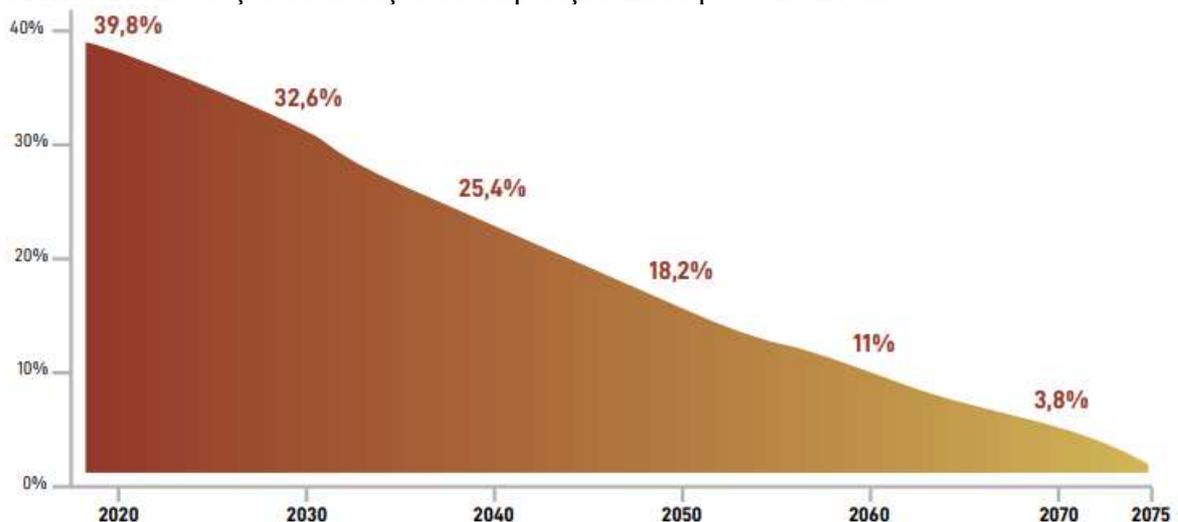
Fonte: Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018).

Conforme projeção da ABRELPE (2020), estima-se que o Brasil experimente um crescimento de quase 50% na geração de RSU até 2050, em comparação com os números de

2019. Durante esse mesmo período, a expectativa é de um aumento populacional de cerca de 12%. Esses números destacam que, para além do crescimento demográfico, o nível de renda da sociedade, representado pelo Produto Interno Bruto (PIB), também tem exercido um impacto significativo na geração de RSU. Outros fatores, de natureza mais complexa e menos passível de medição precisa, também contribuem para esse aumento na geração de resíduos, incluindo a falta de cobrança dos cidadãos pelos serviços de coleta e gerenciamento de resíduos sólidos, bem como o crescente consumo de produtos de uso único e descartáveis.

Desde a sanção da PNRS em 2010 até o momento atual, embora a disposição inadequada de resíduos sólidos tenha sido proibida, não foram implementadas ações e programas consistentes para eliminar essa prática. Considerando a manutenção desse cenário, seriam necessários 55 anos para encerrar completamente os aterros controlados e lixões, como ilustrado no Gráfico 2 (ABRELPE, 2020).

Gráfico 2 – Evolução da situação de disposição inadequada no Brasil



Fonte: ABRELPE (2020).

Essa problemática aponta para a necessidade de alinhar soluções que sejam ambientalmente viáveis e que incorporem objetivos e metas estabelecidos, como a redução dos impactos associados às mudanças climáticas, a preservação e a manutenção de ecossistemas, e a integração de tecnologias de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

### **2.1.2 Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS)**

Em 2010, o Governo Federal promulgou a Lei 12.305/10, que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), posteriormente regulamentada pelo Decreto nº

10.936/22. Essa legislação foi criada com o objetivo de estabelecer uma estrutura normativa federal para abordar os sérios desafios associados à má gestão de resíduos sólidos que persistem até os dias atuais. Além disso, a PNRS visa padronizar e conferir autonomia às legislações estaduais e municipais, preenchendo lacunas e complementando as diretrizes estabelecidas na legislação federal (CASTRO; SOUZA, 2010).

A PNRS caracteriza a gestão integrada de resíduos sólidos como um conjunto de ações direcionadas para encontrar soluções para os resíduos, abrangendo as dimensões políticas, econômicas, ambientais, culturais e sociais, com a participação da comunidade e seguindo o princípio do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2010). A mesma lei estabelece uma definição para o gerenciamento de resíduos sólidos como:

Conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A política inova atribuindo responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e estabelece uma ordem de prioridade para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Essa ordem de prioridade, definida no artigo 9º da PNRS, é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Silva e Capanema (2019).

A PNRS tem como finalidade estabelecer estratégias para promoção e valorização dos resíduos, aumentando a competitividade do setor produtivo, promovendo a inclusão social e definindo as responsabilidades dos estados e municípios na gestão de resíduos sólidos (NASCIMENTO NETO, 2013). A logística reversa, conforme estabelecido na lei, destaca-se

como um instrumento de desenvolvimento econômico e social. Ela engloba um conjunto de ações, procedimentos e recursos destinados a facilitar a coleta e a devolução dos resíduos sólidos ao setor empresarial. Isso possibilita a reutilização desses resíduos em seu ciclo produtivo original, em outros ciclos, ou ainda encaminhá-los para uma destinação final que seja ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A preocupação da população e dos representantes governamentais em relação ao descarte inadequado de resíduos sólidos tem crescido significativamente nos últimos anos. Contudo, esta inquietação é relativamente recente, com esforços frequentes para criar leis que reduzam o impacto ambiental (LADEIRA, 2013).

Além da Lei 12.305/10, há outras legislações e normas federais que sustentam o gerenciamento e manejo dos resíduos sólidos no Brasil, sendo elas:

- a) Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445/07: estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e define a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos como um dos quatro componentes fundamentais participantes do conjunto saneamento básico (BRASIL, 2007);
- b) Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605/98: dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências (BRASIL, 1998);
- c) ABNT NBR 8419/92: fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (ABNT, 1992);
- d) ABNT NBR 10004/04: estabelece os critérios de classificação e os códigos para a identificação dos resíduos de acordo com suas características (ABNT, 2004);
- e) Resolução CONAMA nº 404/08: estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2008).

### ***2.1.3 Classificação e Caracterização dos Resíduos Sólidos***

Existem diversas maneiras de classificar os resíduos sólidos, as mais comuns são por sua composição química, por sua natureza física e pelos riscos potenciais ao meio ambiente (CEMPRE, 2018).

Quanto à composição química, os resíduos podem ser classificados como:

a) resíduos orgânicos: compostos por moléculas de carbono, provêm de restos de alimentos, dejetos humanos e carcaças de animais;

b) resíduos inorgânicos: compostos por plástico, papel e diversos materiais de origem inorgânica que podem ser reciclados.

Quanto à natureza física, tem-se:

a) resíduos secos: isentos de umidade e passíveis de reciclagem, em sua maioria inorgânicos;

b) resíduos molhados: possuem umidade de alguma forma, impossibilitando o processo de reciclagem, podendo ser orgânicos ou até mesmo inorgânicos contaminados, como papel higiênico, guardanapo ou filtro de papel utilizados.

A NBR 10004/04 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente (ABNT, 2004). Essa classificação é dada como:

a) resíduos classe I - perigosos: aqueles que, de acordo com suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública;

b) resíduos classe II - não perigosos:

- resíduos classe II A - (não perigosos e não-inertes): aqueles que não se apresentam como inflamáveis, corrosivos, tóxicos, patogênicos e não possuem tendência a sofrer reações químicas;

- resíduos classe II B - (não perigosos e inertes): aqueles que se mostram indiferentes ao contato com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, salvo apenas características como aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Além das classificações apresentadas, Quezado (2010) afirma que outra forma importante de especificação é conforme sua origem, ou seja, lugar onde o resíduo foi gerado. Essa avaliação permite prever certas singularidades nos materiais.

As subdivisões existentes para a origem dos resíduos são extremamente variadas, no entanto, se destacam:

a) resíduos domiciliares: originários de atividades domésticas;

b) resíduos de limpeza urbana: originários da varrição, limpeza de vias públicas, podas de árvore, entre outros serviços de limpeza urbana;

c) resíduos sólidos urbanos: compreendem os resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana;

d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: gerados nessas atividades, excetuando-se os resíduos de limpeza urbana, os resíduos de serviços público de saneamento básico, serviços de saúde, serviços de transporte e de construção civil.

Se os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço forem classificados como não perigosos, estes, em razão da sua natureza, composição ou volume, podem ser equiparados aos resíduos sólidos domiciliares pelo poder público municipal;

e) resíduos radioativos: originários da atividade nuclear, que devem ser manuseados apenas com equipamentos e técnicas adequadas;

f) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: gerados nessas atividades, excetuados os resíduos sólidos urbanos;

g) resíduos industriais: originários dos processos produtivos e instalações industriais;

h) resíduos de serviços de saúde: originários dos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);

i) resíduos da construção civil: originários das construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

j) resíduos agrossilvopastoris: originários das atividades agropecuárias e silviculturais, incluindo os relacionados à insumos utilizados nessas atividades;

k) resíduos de serviços de transportes: originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários;

l) resíduos de mineração: originários na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

De acordo com Moura *et al.* (2017), o aumento da conscientização sobre os riscos à saúde e ao meio ambiente decorrentes dos resíduos sólidos é, em grande parte, devido ao seu potencial infeccioso. Portanto, é essencial adotar um conjunto de medidas voltadas para a preservação das condições socioambientais.

Nesse contexto, é estabelecida a responsabilidade de gestão para cada categoria de resíduos, conforme apresentado na Tabela 2, de modo a que seja garantida a sua destinação ambientalmente correta.

Tabela 2 – Responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo de resíduo

<b>Tipos de Resíduos</b>	<b>Responsável</b>
Domiciliar	Prefeitura
Comercial	Prefeitura*
De Serviços	Prefeitura
Industrial	Gerador (indústrias)
Serviços de saúde	Gerador (hospitais, etc.)
Portos, aeroportos e terminais ferrov/rodov.	Gerador (portos, etc.)
Agrícola	Gerador (agricultor)
Entulho	Gerador*
Radioativo	Comissão Nacional de Energia Nuclear

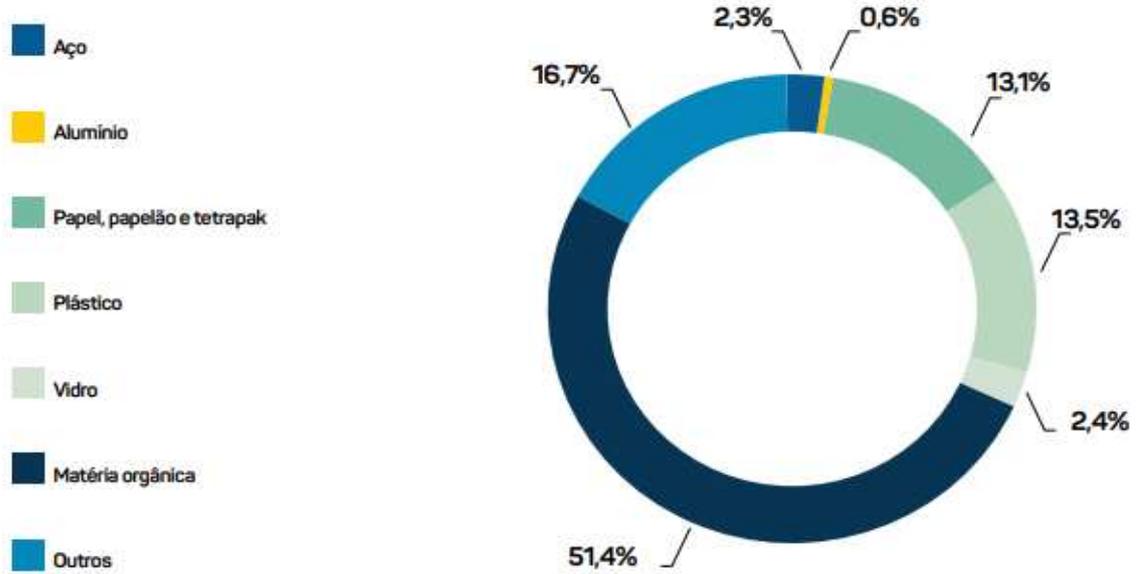
Fonte: Schalch *et al.* (2002).

\*A prefeitura é corresponsável por pequenas quantidades (geralmente menos que 50 kg/dia), de acordo com a legislação municipal específica.

Assim como classificar os resíduos sólidos, caracterizá-los é importante para definir formas adequadas e específicas de disposição final, implantar processos de tratamento para estes resíduos e subsidiar sistemas de coleta seletiva (GALDINO; MARTINS, 2016). Uma das formas de caracterização largamente utilizadas é a composição gravimétrica. Essa avaliação normalmente consiste em um processo de análise das proporções ou percentagens de diferentes componentes ou elementos em uma substância ou mistura, com base na sua massa (QUEZADO, 2010).

O Gráfico 3 apresenta os dados relativos à estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil. A matéria orgânica representa a maior fração, correspondendo mais de 50%, seguido pelos resíduos secos (aço, alumínio, papel, papelão, tetrapak, plástico e vidro), representando 32%. O conhecimento da composição gravimétrica possibilita o aproveitamento das frações, como geração de renda através da fração seca e produção de composto com a matéria orgânica (SANTOS; MOTA, 2010).

Gráfico 3 – Estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil



Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

Para que se obtenha um entendimento melhor e, conseqüentemente, um aproveitamento energético mais eficiente, é importante conhecer alguns termos amplamente utilizados na caracterização dos resíduos sólidos urbanos, assim como a composição gravimétrica, sendo eles:

- a) peso específico: compreende o peso dos resíduos em função do volume por eles ocupado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Esse cálculo é crucial para o projeto e dimensionamento de equipamentos e instalações;
- b) teor de umidade: característica que define, principalmente, o processo de tratamento e destinação do resíduo, com grande variação decorrente das estações do ano e da incidência de chuvas. Maciel (2003) afirma que o teor de umidade desempenha um papel essencial na previsão da produção de biogás, se esse valor for inferior a 40%, os microrganismos no aterro sanitário não serão capazes de decompor o material;
- c) poder calorífico: indica a quantidade de calor liberado por uma determinada quantidade de resíduos durante o processo de queima. É um elemento fundamental para determinar a quantidade de energia contida nos resíduos, possibilitando o projeto de dispositivos para a recuperação de energia (SCHALCH *et al.*, 2002).

## 2.2 Aproveitamento Energético de RSU

Como exposto nos tópicos anteriores, a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis no gerenciamento de resíduos é uma preocupação crescente em nível global, devido ao aumento na geração desses materiais e à necessidade de reduzir o impacto no meio ambiente. É essencial estabelecer infraestruturas, sistemas e tecnologias para garantir que o tratamento e a disposição ambientalmente adequados dos resíduos sólidos urbanos sejam universalizados.

Junto com o contínuo crescimento na geração de resíduos sólidos, há uma crescente demanda por energia devido ao desenvolvimento tecnológico, ao aumento populacional e às atividades industriais. Nesse cenário, a busca por fontes alternativas de energia se torna uma questão de grande relevância. Considerando esses fatores, os resíduos podem ser percebidos como uma potencial fonte de energia por meio de diversas tecnologias capazes de aproveitar diferentes recursos energéticos.

A PNRS, em seu artigo 6º, promove o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial com foco na melhoria dos processos produtivos e na reutilização dos resíduos sólidos, incluindo a recuperação e a conversão desses resíduos em energia. Além disso, a lei supracitada afirma em seu artigo 9º que as tecnologias destinadas à recuperação energética de RSU podem ser adotadas, desde que sua viabilidade técnica e ambiental seja demonstrada e que seja implementado um programa de monitoramento das emissões de gases tóxicos aprovado pelas autoridades ambientais (BRASIL, 2010).

Considerando o período até 2040, o Planares define quatro metas a serem atingidas em direção à universalização da gestão ambientalmente adequada dos RSU, sendo elas: eliminação de lixões e aterros controlados até 2024, recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico, recuperação da fração seca dos materiais recicláveis por meio de processos de reciclagem e recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico (ABRELPE, 2022). Considerando os esforços para atingimento dessas metas, tem-se para 2040 uma projeção da quantidade em massa de RSU por tipos de destinação final, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Destinação final de RSU projetada para 2040 sem materiais recicláveis

<b>Destinação</b>	<b>Massa (t/ano)</b>
<b>Tratamento da fração orgânica</b>	
Tratamento biológico	14.881.320
<b>Recuperação energética</b>	
Tratamento térmico	16.093.872
<b>Disposição final em aterro sanitário</b>	
Sem aproveitamento energético	22.327.153
Com aproveitamento energético	34.883.254
<b>Total</b>	<b>88.185.600</b>

Fonte: ABRELPE (2022).

Portanto, observa-se de fato uma tendência para adoção de tecnologias de aproveitamento energético. Nesse sentido, é fundamental examinar as diversas tecnologias disponíveis, a fim de explorar o potencial de cada técnica em relação à geração de energia a partir dos resíduos. Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por apresentar detalhadamente as duas tecnologias mais utilizadas e de melhor rendimento, sendo elas aterro com captura de gás e incineração, como também abordar a compostagem e apresentar uma visão sucinta sobre outras tecnologias.

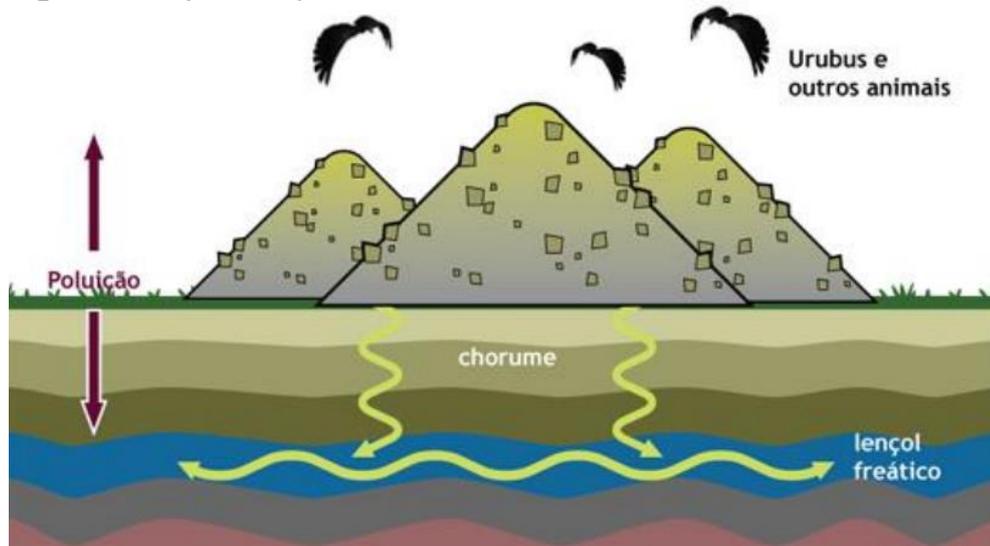
### 2.2.1 Aterro com Captura de Gás

O aterro sanitário é uma extensa área de terreno que, mediante a aplicação de técnicas de engenharia apropriadas, tem a capacidade de isolar e confinar os resíduos sólidos. Segundo a NBR 8419/92, pode-se definir um aterro sanitário de RSU como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

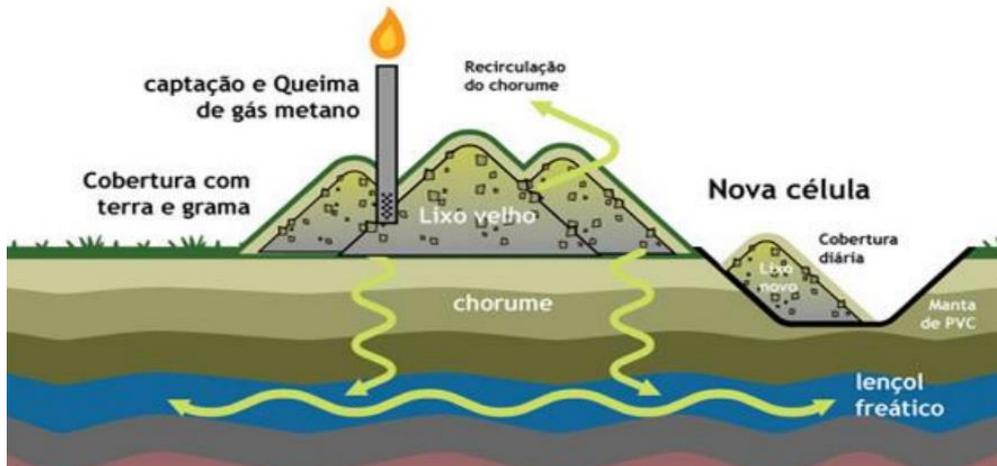
Ao contrário dos lixões e aterros controlados mostrados nas Figuras 5 e 6, os aterros sanitários possibilitam a impermeabilização do solo e o controle das emissões gasosas, minimizando assim os impactos ambientais associados à essas técnicas. A construção adequada de um aterro requer a observância de vários procedimentos, incluindo a seleção apropriada do local, a implementação de sistemas de impermeabilização, a instalação de sistemas de coleta de efluentes, e uma operação eficiente (QUEZADO, 2010).

Figura 5 – Representação ilustrativa dos lixões



Fonte: Gomes (2018).

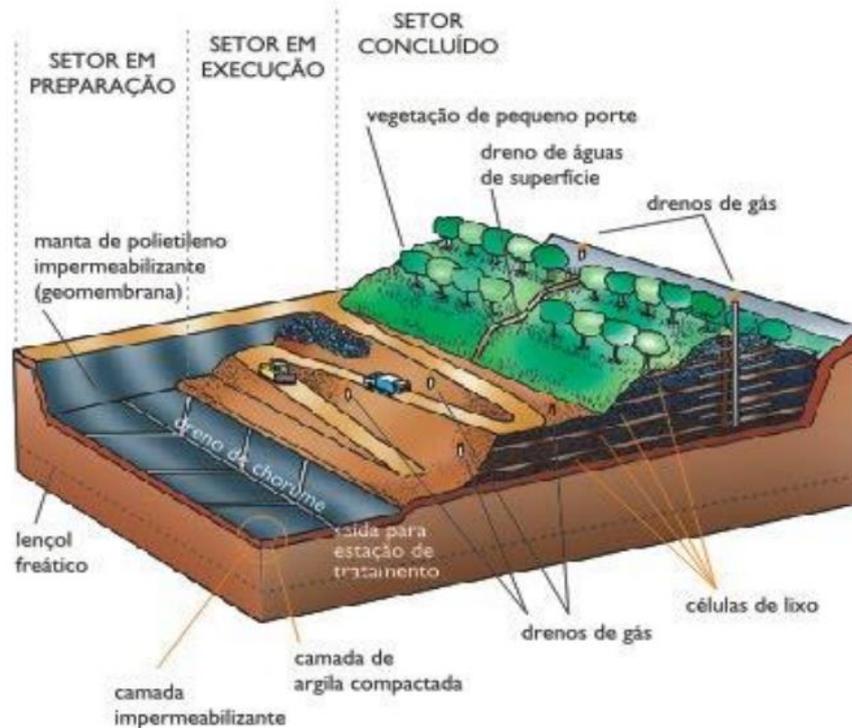
Figura 6 – Representação ilustrativa dos aterros controlados



Fonte: Gomes (2018).

O aterro sanitário é amplamente utilizado no mundo devido ao seu custo em comparação com outras alternativas, como incineração, que demandam investimentos significativos em infraestrutura. Mesmo em cenários onde outras tecnologias são economicamente viáveis, a presença de aterros sanitários próximos é necessária devido à produção de rejeitos ou ainda por fator de segurança, na ocorrência de imprevistos que paralise as instalações. A estrutura do aterro sanitário é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Representação ilustrativa dos aterros sanitários



Fonte: Gomes (2018).

Os lixiviados gerados pela decomposição dos resíduos em aterros precisam ser drenados e tratados para evitar impactos ambientais. A drenagem através dos resíduos sólidos pode acelerar a biodegradação dos resíduos, já que contém microrganismos decompositores. Diferentes métodos de tratamento de lixiviados podem ser usados, incluindo lagoas de estabilização, processos físico-químicos, recirculação e estações de tratamento de esgoto. Além do chorume, nos aterros sanitários, a degradação dos resíduos gera principalmente os gases metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), conhecidos como biogás. É essencial drenar o biogás para fora do aterro a fim de prevenir incêndios, explosões e problemas de estabilidade (LIMA, 2012).

A captura do biogás de aterros sanitários apresenta diversas vantagens. Além de ser uma solução para o problema de vazamento de gás evitando riscos de explosões, contribui para a redução das emissões de metano. Por meio dessa alternativa de tratamento de RSU, é possível atingir um dos objetivos do Protocolo de Kyoto, que busca a redução das emissões de gases de efeito estufa, incentivando a mitigação das mudanças climáticas (LADEIRA, 2013). A combustão do biogás produz créditos de carbono, pois, embora gere  $\text{CO}_2$ , o impacto dele no aquecimento global é aproximadamente vinte e uma vezes menor do que o do metano (LIMA, 2012).

A estratégia de aproveitamento energético em um aterro sanitário consiste em coletar o biogás produzido durante a decomposição dos resíduos armazenados no local, para posteriormente utilizar esse gás como fonte de combustível. A principal reação biológica que ocorre nos aterros é a digestão anaeróbica, que se desenvolve na ausência de oxigênio e acontece em três etapas distintas. Na primeira fase, as bactérias fermentadoras desdobram a matéria orgânica complexa em moléculas solúveis. Na segunda fase, essas moléculas são convertidas por bactérias em ácidos orgânicos simples, incluindo ácido acético, ácido propanoico, ácido butílico e etanol. Por fim, na terceira fase, bactérias metanogênicas produzem metano e dióxido de carbono a partir dos ácidos (GOMES, 2018).

Conforme Quezado (2010), em um aterro com aproveitamento energético, é possível teoricamente gerar de 370 a 400 Nm<sup>3</sup> de gás por tonelada de resíduos aterrados, com um poder calorífico de 5.800 kcal/Nm<sup>3</sup>, o que equivale a um valor 22% superior ao do gás liquefeito de petróleo (GLP). A proporção exata de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no biogás pode variar dependendo da idade do aterro e de diversos outros fatores. Esses fatores incluem a umidade, a composição dos resíduos no local, o tamanho das partículas, o pH do meio, a idade dos resíduos, a temperatura, o projeto do aterro e sua operação (GOMES, 2018).

A extração do gás em aterros pode ser realizada através de tubos verticais ou horizontais. Os tubos verticais são usados em aterros já estabelecidos, enquanto os tubos horizontais são instalados durante o depósito de resíduos para uma extração mais eficaz desde o início da produção do gás. Em aterros sanitários que seguem as normas nacionais, a instalação da tubulação de coleta de gás já é prevista pela ABNT, facilitando o processo de extração (HENRIQUES, 2004).

O gás de aterro tem diversas aplicações energéticas, como seu uso em motores a gás acoplados a geradores para produção de energia elétrica. Além disso, pode ser direcionado para aquecimento de água em boilers a gás.

Visando diminuir a presença de substâncias corrosivas nas tubulações e motores, bem como reduzir a concentração de gases prejudiciais ao meio ambiente, é possível efetuar a purificação do biogás. Após purificação, o gás pode até ser inserido na rede de gás natural. A recuperação do gás pode ser feita por meio de diferentes sistemas de extração e utilização, permitindo seu uso como combustível veicular, em células de combustível, evaporação de chorume, entre outras aplicações (HENRIQUES, 2004). Isso o torna uma fonte versátil e sustentável de energia.

Para compreensão mais aprofundada dessa tecnologia, a Tabela 4 apresenta uma listagem de vantagens e desvantagens.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens do projeto de aterro sanitário com captura de gás

Vantagens	Desvantagens
Recebem os RSU praticamente da maneira como são recolhidos, através das estações de transbordo	Exige grandes áreas para implantação e impossibilita o uso da área por muitos anos após o fechamento do aterro
Emissão de carbono distribuída no tempo, uma vez que o ciclo de vida de um aterro é em média 40 anos	Exige topografia adequada, além de captura e tratamento do lixiviado
Geram biogás que pode ser capturado e aproveitado	Após capacidade esgotada, exige ainda cuidados e manutenção por pelo menos 30 anos
Dispõem o lixo de maneira adequada ambientalmente	Gera menor quantidade de biogás ao longo do tempo
Tratamento de baixo custo	Provoca grande movimentação de terra e resíduos

Fonte: Quezado (2010).

### 2.2.2 Incineração

A incineração é um procedimento no qual os resíduos são queimados na presença de oxigênio em excesso, promovendo a redução do peso e volume dos resíduos. Sobretudo nas grandes cidades, onde a disponibilidade de locais para a criação de aterros sanitários torna-se cada vez mais limitada, a incineração vem sendo apontada como uma das opções interessantes para o tratamento de resíduos sólidos.

Os subprodutos resultantes da incineração são, em sua maioria, gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) proveniente do excesso de ar que não queimou completamente. Somado a isso, tem-se água (H<sub>2</sub>O), cinzas e escórias compostas por metais ferrosos e materiais inertes, como vidro e pedras. A escória, tipicamente representando cerca de 15 a 20% da massa original dos resíduos, precisa ser destinada a um aterro sanitário, enquanto o ferro reciclável pode ser reaproveitado (SCHALCH *et al.*, 2002).

De acordo com Kühl *et al.* (2015), quando se avalia o desempenho de um incinerador, são fundamentais três fatores-chave: a temperatura (que fornece a energia requerida para a quebra e recombinação das moléculas), o tempo de permanência (tempo

necessário para que as reações de oxidação ocorram sob a temperatura ideal) e a turbulência ou turbilhonamento (indicativa do grau de mistura entre os resíduos e o oxigênio).

Além disso, conforme apontado por Pavan (2010), a eficiência do processo de incineração também é influenciada pelas características do resíduo a ser queimado: poder calorífico inferior (PCI), análise imediata, análise elementar e teores de elementos tóxicos. O PCI determina a quantidade de energia útil que será liberada durante a queima dos RSU. Quanto maior o PCI, maior será a potência gerada no interior do incinerador, resultando em temperaturas mais elevadas. A análise imediata avalia a quantidade de água, cinzas e materiais voláteis. A análise elementar, por sua vez, quantifica nitrogênio, carbono e hidrogênio, permitindo calcular a quantidade de ar necessária para a combustão completa dos RSU. É essencial analisar a presença de elementos tóxicos, como chumbo, mercúrio, enxofre, cloro e outros para identificar possíveis componentes prejudiciais nos resíduos. Dessa forma, torna-se possível dimensionar o sistema de purificação dos gases nas unidades de forma adequada.

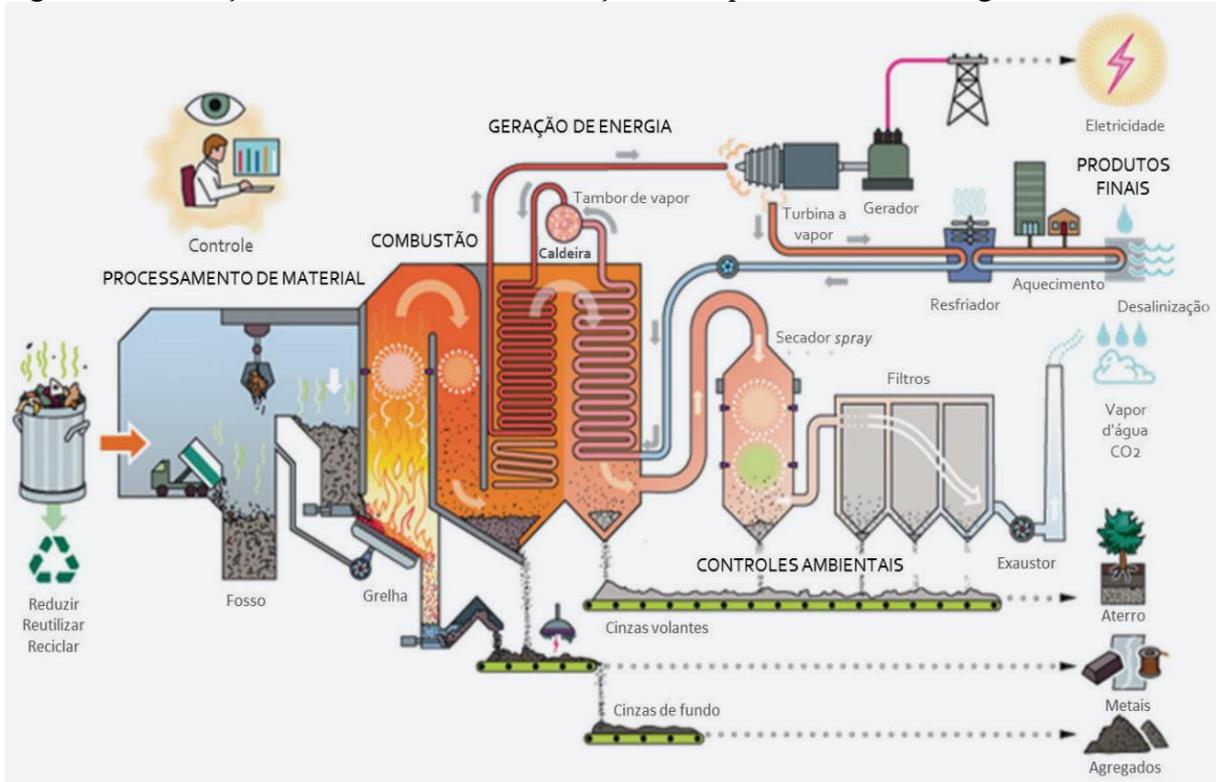
O método predominantemente utilizado nas usinas de incineração de RSU é *Mass-fired Combustion System*, Sistema de Combustão com Queima em Massa. Nesse processo, os resíduos são incinerados sem tratamento prévio, exceto pela remoção de itens volumosos que possam prejudicar o processo, identificados por inspeção visual, como eletrodomésticos, por exemplo (LEME, 2010). Conforme Araújo (2021), em uma instalação de incineração de RSU, há três tipos de câmaras de combustão mais comuns: grelha móvel, forno rotativo e leito fluidizado, sendo a grelha móvel a mais utilizada.

O processo de incineração normalmente envolve duas etapas. Inicialmente, os resíduos são queimados na câmara primária, onde a temperatura é regulada entre 500°C e 900°C. Nesse estágio, a entrada de oxigênio é controlada para evitar a volatilização de metais presentes nos resíduos e minimizar a formação de óxidos nitrosos. Em seguida, a fase gasosa gerada é direcionada para a câmara secundária, onde ocorre a queima completa com temperaturas mais elevadas (750°C-1250°C) sob atmosfera altamente oxidante. Os gases resultantes são transformados em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O), além de quantidades menores de compostos nocivos, como dioxinas e furanos. Em seguida, os gases passam por sistema de controle de poluição, incluindo estágios, como *scrubbers* para ácidos, precipitadores eletrostáticos para poeira e filtros para partículas finas, antes de serem liberados na atmosfera por uma chaminé (HENRIQUES, 2004).

Inicialmente, a incineração foi aplicada com o objetivo principal de reduzir a massa, o volume e a periculosidade dos resíduos. Além desses propósitos, com o avanço dos estudos na área, passou-se a utilizar a energia térmica gerada durante o processo de

combustão, aproveitando o poder calorífico dos resíduos inflamáveis (SILVA SOBRINHO, 2021). Na Figura 8 é apresentada uma usina de incineração de RSU com aproveitamento energético.

Figura 8 – Ilustração de uma usina de incineração com aproveitamento energético



Fonte: Silva Sobrinho (2021).

O processo de geração de eletricidade se dá através do direcionamento dos gases que saem do incinerador para uma caldeira, onde o vapor é produzido por meio da transferência de calor com os gases da combustão. Esse vapor pode ser empregado diretamente para aquecer a água em indústrias situadas nas proximidades da usina. Ou pode ser convertido em energia elétrica por meio de instalações especiais, como turbinas, e vendido às empresas de distribuição de energia (SCHALCH *et al.*, 2002). Na Tabela 5 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do processo de incineração de RSU.

Tabela 5 – Vantagens e desvantagens do processo de incineração

Vantagens	Desvantagens
Reduz 70 - 75% da massa e cerca de 90% do volume dos RSU	Necessita de tratamento prévio para retirada de metais, vidro e materiais grandes
Não exige grandes áreas como o aterro, apenas a área da usina	Exige redução de umidade nos resíduos de alimentos
Ausência de chorume e emissões de CH <sub>4</sub>	Investimento maior em comparação ao aterro sanitário

Gera significativa quantidade de energia elétrica, reduzindo a queima de combustíveis fósseis em termelétricas

Pode emitir poluentes como CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, material particulado, dioxinas e furanos

---

Fonte: Quezado (2010).

### 2.2.3 Compostagem

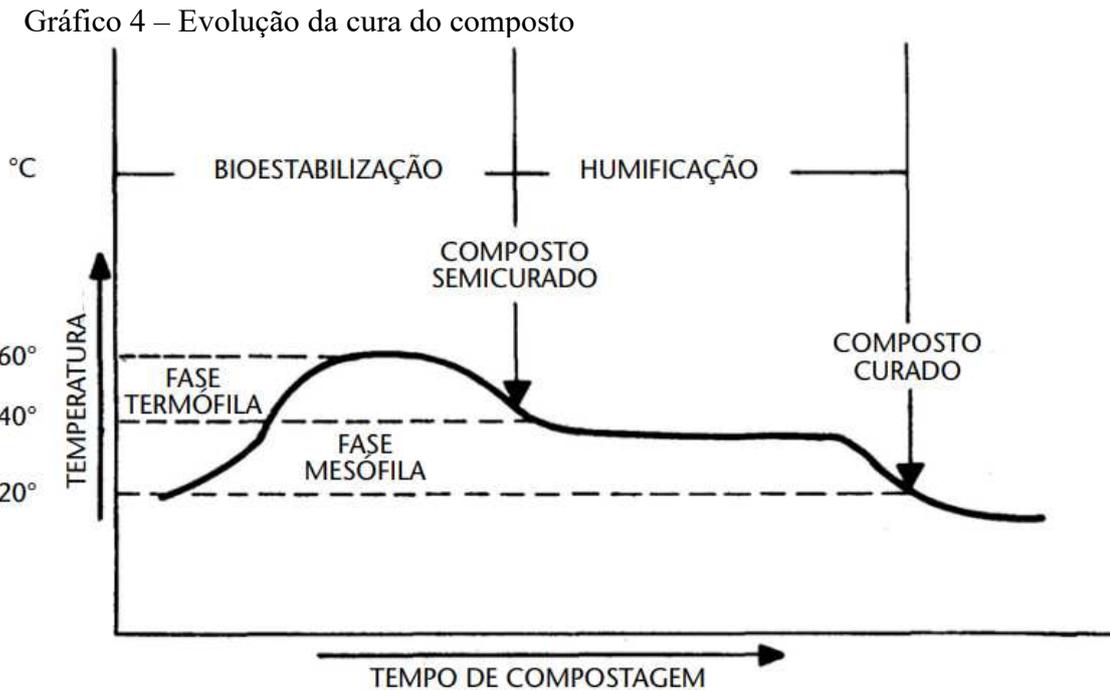
A compostagem desempenha um papel de extrema relevância no manejo dos resíduos sólidos urbanos, uma vez que, conforme apontado no Planares (2022), aproximadamente 51% do total de resíduos gerados em um município consistem em matéria orgânica. De maneira sucinta, a compostagem pode ser definida como um processo de conversão de resíduos orgânicos em adubo humificado. Segundo Lima (2012), este é um procedimento altamente benéfico, uma vez que está voltado para a preservação do meio ambiente (através do tratamento de resíduos contaminados, controle da poluição e reciclagem de materiais), para a proteção da saúde pública (ao interromper os ciclos de várias doenças e eliminar vetores) e para a promoção da cidadania (ao gerar oportunidades de emprego, incentivar práticas agrícolas, entre outros benefícios).

É fundamental salientar que nem todo material orgânico é apropriado para o processo de compostagem. Alguns materiais orgânicos, embora de origem natural, podem prejudicar o processo de compostagem devido a características como a não putrescibilidade, a difícil decomposição, a presença de substâncias poluentes ou questões de higiene. Entre os materiais não adequados para compostagem, destacam-se carnes, peixes, gorduras, queijos, plantas doentes, fezes de animais domésticos, papel higiênico e fraldas (QUEZADO, 2010).

Pode-se identificar dois estágios distintos na compostagem. Durante a etapa de degradação rápida, também referida como bioestabilização, ocorre uma atividade microbiana intensa e uma rápida transformação da matéria orgânica. Isso resulta em um considerável consumo de oxigênio pelos microrganismos, aumento da temperatura e notáveis modificações na massa dos resíduos em compostagem, que adquirem uma coloração escura e perdem o odor desagradável. Na etapa subsequente, conhecida como maturação, a atividade biológica é reduzida, o que implica em uma menor demanda por aeração. Nesse estágio, o processo ocorre em temperatura ambiente e é dominado por transformações de natureza química, como a polimerização de moléculas orgânicas estáveis, um processo conhecido como humificação (FERNANDES; SILVA, 1999).

Do ponto de vista prático, existem essencialmente dois estágios principais de decomposição para o material sujeito ao processo de compostagem: o semicurado ou

tecnicamente bioestabilizado e o curado ou humificado. O primeiro estágio sugere que o composto já está pronto para ser utilizado como fertilizante, sem representar riscos para as plantas. O segundo estágio indica que o material está completamente decomposto e estabilizado, apresentando uma qualidade adequada para aplicação (CEMPRE, 2018). A progressão do processo de cura pode ser observada no Gráfico 4.



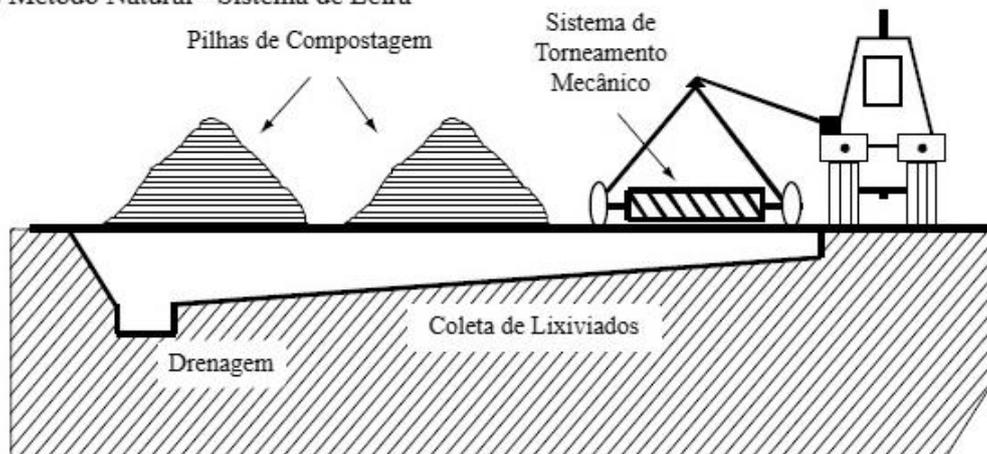
Fonte: Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018).

O processo de compostagem é afetado por diversos fatores, envolvendo aspectos nutricionais e ambientais. Alguns dos principais elementos que exercem influência sobre a compostagem incluem: aeração, temperatura, umidade e relação carbono-nitrogênio (SCHALCH *et al.*, 2002).

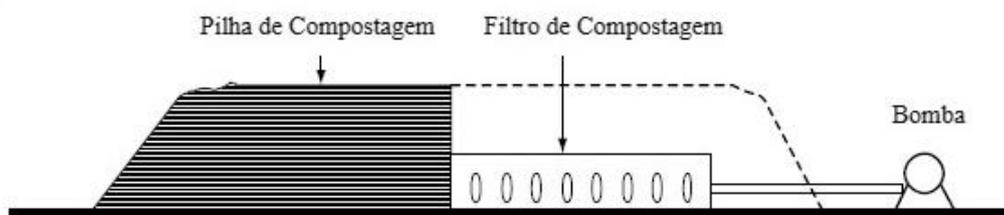
Em geral, a compostagem pode ser realizada por meio de dois principais métodos. No método natural, a fração orgânica dos resíduos é empilhada em um local apropriado e é periodicamente revirada para promover a aeração necessária ao processo de decomposição biológica. O tempo necessário para que o processo se complete varia de três a quatro meses. No método acelerado, a aeração é induzida através de tubulações perfuradas sob as pilhas de resíduos ou por meio de reatores rotatórios, conforme Figura 9, nos quais os resíduos se movem na direção oposta ao fluxo de ar. Em seguida, os resíduos são empilhados, semelhante ao método natural. O tempo de permanência nos reatores é de cerca de quatro dias, e o tempo total de compostagem acelerada varia de dois a três meses (LIMA, 2012).

Figura 9 – Principais tipos de sistemas de compostagem

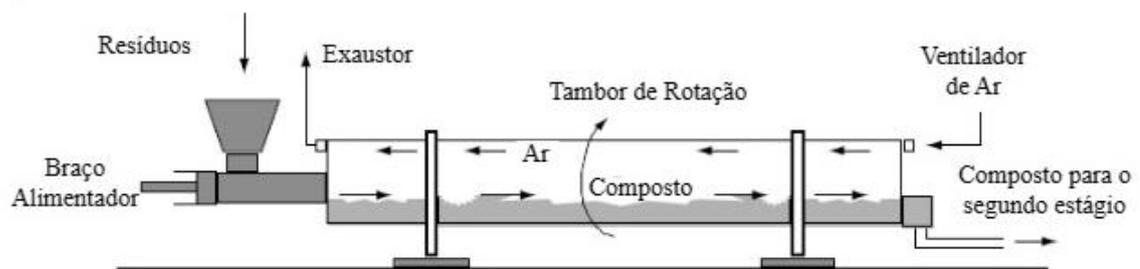
a) Método Natural - Sistema de Leira



b) Método Acelerado - Sistema de Aeração Forçada



c) Método Acelerado - Sistema de Tambor Rotativo



Fonte: Adaptado de Williams (2005).

A aplicação da compostagem pode se configurar como uma alternativa interessante para o tratamento de resíduos orgânicos, no entanto, esse método possui algumas limitações, como o fato dos resíduos chegarem à usina de compostagem completamente misturados, tornando o processo de beneficiamento mais oneroso. Na Tabela 6 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens dessa tecnologia.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do processo de compostagem

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo e fácil implantação	Não possui viés econômico
Revitalização do solo	Liberação de biogás e lixiviado sem tratamento
Redução de impacto advinda de resíduos orgânicos	Possível proliferação de vetores
Minimização de material enviado para os aterros sanitários	Propagação de odores desagradáveis
Sem dispêndio de energia elétrica	Demora no tratamento, em média, 120 dias
Aumenta a vitalidade das pastas e reduz risco de pragas	Descontrole em uma das fases pode tornar o composto inadequado

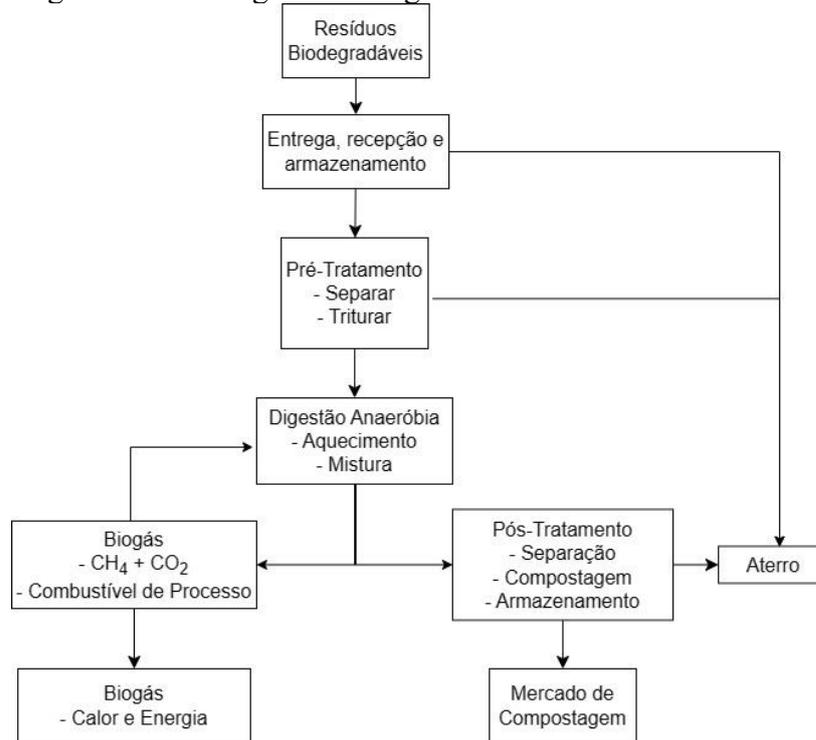
Fonte: Quezado (2010).

#### 2.2.4 Outras Tecnologias

Embora os aterros sanitários ainda sejam considerados uma opção economicamente mais acessível em comparação com outras alternativas, as tecnologias de incineração e compostagem têm mostrado crescimento nos últimos anos. Além disso, outras técnicas inovadoras se destacam, sendo elas a digestão anaeróbica em reator, a gaseificação, a pirólise e o tratamento por plasma. Essas técnicas, quando adaptadas para diferentes situações, volume e tipos de resíduos, possuem o potencial de ganhar aceitação e serem aplicadas.

A digestão anaeróbica pode ocorrer tanto em aterros sanitários quanto em reatores controlados. Em reator fechado, há maior precisão no controle do processo, permitindo a coleta total do gás para utilização, ao contrário dos aterros sanitários, onde a eficiência de coleta é geralmente inferior a 50%. Além disso, enquanto o processo em aterros sanitários leva muitos anos para degradar os resíduos, a digestão anaeróbica em reator conclui o processo em algumas semanas. O objetivo principal é gerar um gás rico em metano, aplicável como combustível ou matéria-prima química. O resíduo sólido resultante desse processo também apresenta vantagens, podendo ser tratado e utilizado como fertilizante. A digestão anaeróbica já é empregada há muito tempo no tratamento de lodo de esgoto e resíduos agrícolas, e vem sendo adaptada para lidar com resíduos sólidos urbanos e industriais (WILLIAMS, 2005). Na Figura 10, apresenta-se o fluxograma do processo de digestão anaeróbica.

Figura 10 – Fluxograma da digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de Williams (2005).

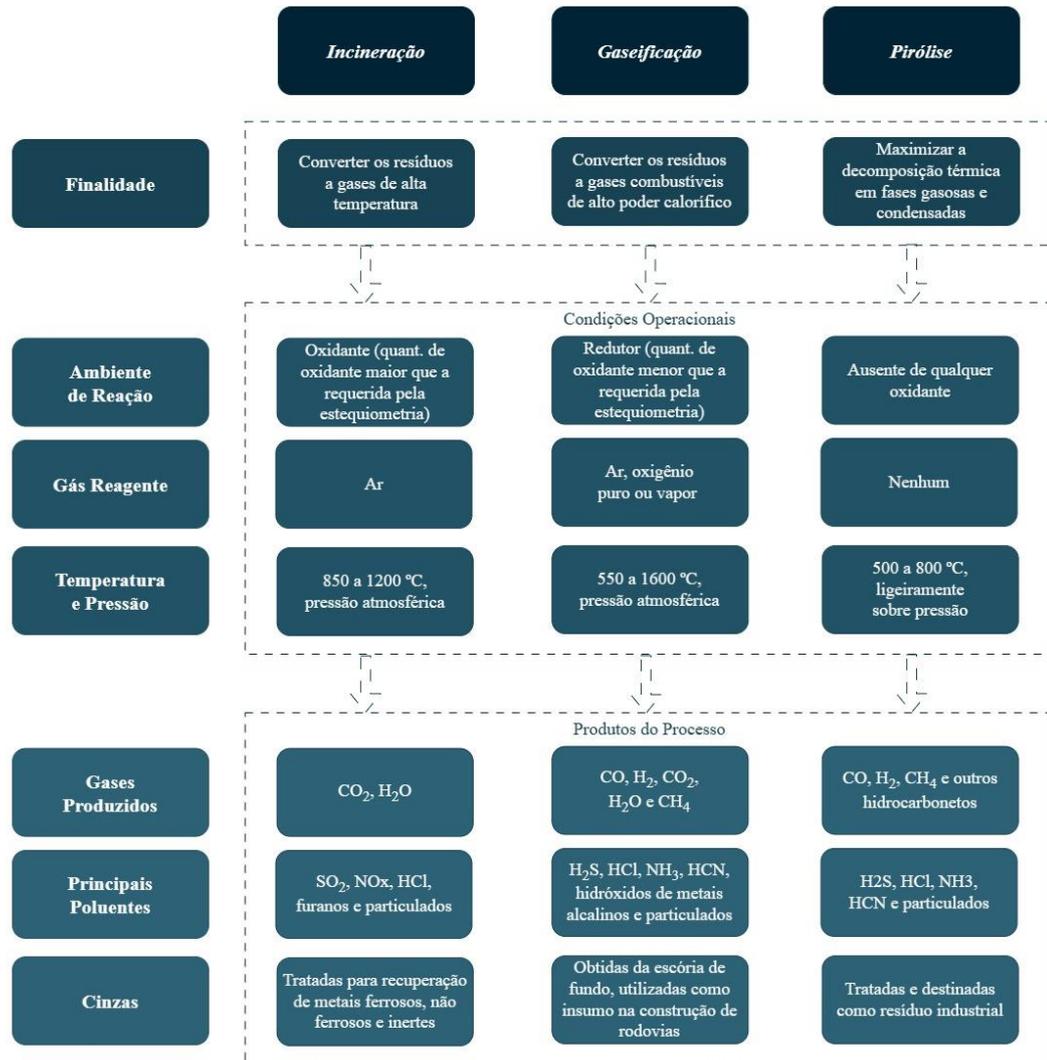
Outra tecnologia emergente, que se apresenta como uma alternativa eficiente para a redução considerável do volume de alguns tipos de resíduos, é a gaseificação. Desenvolvida no século XIX, o processo consiste na conversão térmica, em que a combustão parcial de substâncias orgânicas a altas temperaturas gera produtos que podem ser utilizados como matéria-prima ou como combustíveis (ARAÚJO, 2021). Essa alternativa atinge temperaturas mais elevadas que no processo de incineração, reduzindo assim os índices de contaminantes e resultando em eficiência de até 30% na conversão de energia (MULLER *et al.*, 2018). O produto do processo de gaseificação, por envolver reações entre carbono e oxigênio com formação de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, resulta em uma mistura gasosa, juntamente com um efluente líquido contendo matéria orgânica e resíduo sólido (LADEIRA, 2013).

O gás produzido possui um elevado teor de energia e pode ser queimado em um boiler a gás sem a necessidade de limpeza externa, como ocorre em alguns processos de incineração (GOMES, 2018). Os gaseificadores podem ser divididos em gaseificadores de leito fixo (corrente ascendente e descendente); gaseificadores de leito fluidizado (borbulhantes e circulantes); gaseificadores de fluxo arraste (*entrained flow*); gaseificadores de forno rotativo; gaseificadores de plasma e gaseificadores de grelha móvel (ARAÚJO, 2021)

Além da incineração e da gaseificação, outra tecnologia térmica pode ser utilizada no tratamento de RSU: a pirólise. Na Figura 11 são apresentadas as principais diferenças entre

essas três tecnologias. Segundo Gomes (2018), na pirólise, a matéria é exposta a temperaturas extremamente altas, e a queima é realizada sem a presença de oxigênio, isso permite que o processo transforme a biomassa em três frações: sólida (cinzas e carbono), líquida (óleos pirolíticos) e gasosa (composta por hidrocarbonetos). O que define padrões de quantidade e qualidade do produto do processo de pirólise são as condições de operação do processo.

Figura 11 – Diferenças entre incineração, gaseificação e pirólise



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Os três tipos de pirólise encontrados em evidência na literatura são lenta ou convencional, rápida e *flash*. Os parâmetros operacionais que as diferenciam são: temperatura final, taxa de aquecimento, tamanho da partícula e tempo de residência (ARAÚJO, 2021).

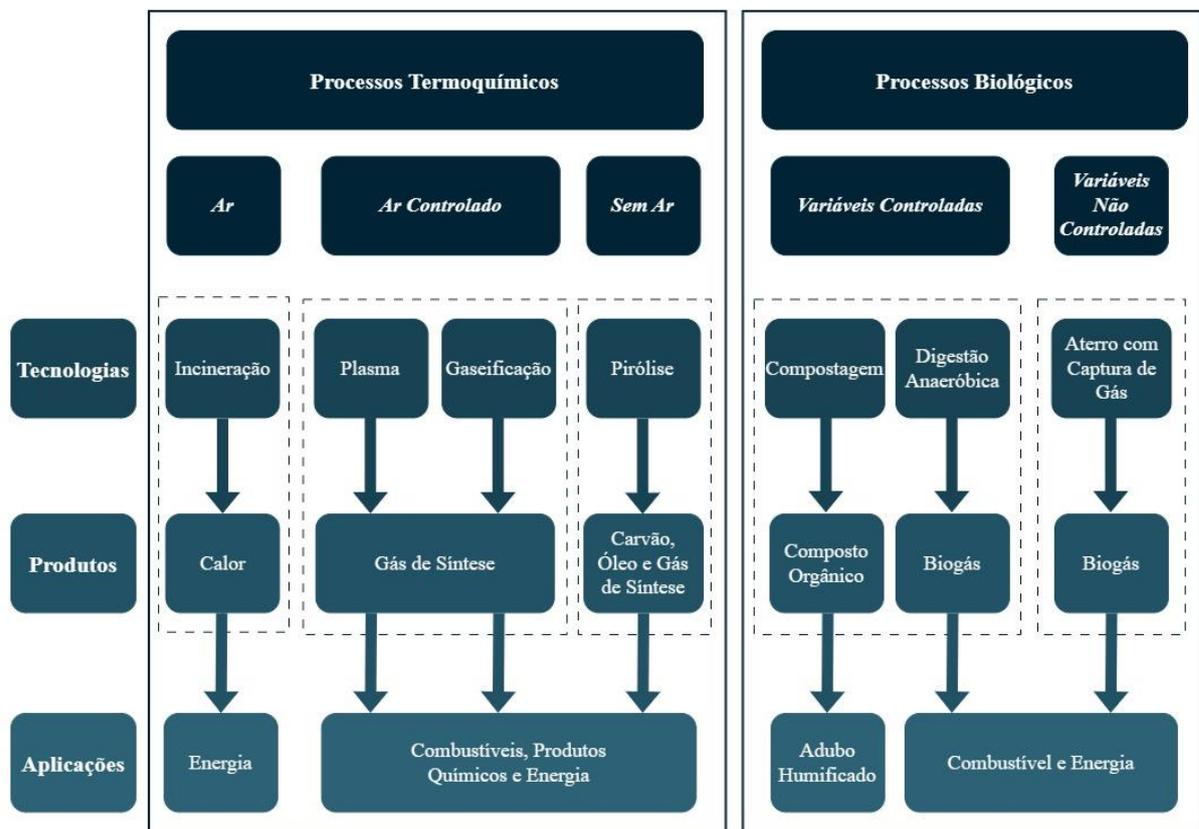
O produto obtido através da pirólise pode variar de acordo com o processo utilizado. A pirólise convencional permite a produção das três frações (gás, óleos pirolíticos e carvão), a pirólise rápida produz um composto exclusivamente da fração líquida e a pirólise

*flash* produz principalmente óleos pirolíticos e gás (SILVA, 2016).

Outra tecnologia térmica mais recente é o plasma ou arco de plasma. Essa nova tecnologia é um tipo de gaseificação e envolve a trituração e superaquecimento dos resíduos. No método de plasma, a fonte de calor é um gás de plasma com temperatura muito elevada (até 15.000 °C), gerado por tochas de arcos voltaicos. Isso possibilita o controle independente da temperatura do sistema, sem depender da alimentação do reator ou do fornecimento de agente gaseificante. Dessa forma, é possível haver mudanças no tamanho das partículas da alimentação sem impactar a formação do gás de síntese. O plasma quebra as moléculas orgânicas dos resíduos em átomos simples e não nocivos, como carbono e hidrogênio, produzindo um gás mais “limpo”, enquanto as moléculas inorgânicas são fundidas e convertidas em resíduos inertes não lixiviados. Esses resíduos não apresentam riscos ao meio ambiente e podem ser utilizados como material agregado na construção civil (ARAÚJO, 2021).

A Figura 12 contém um fluxograma geral que apresenta as tecnologias de aproveitamento energético abordadas no presente trabalho e os seus principais produtos e aplicações.

Figura 12 – Tecnologias de aproveitamento energético de RSU



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

## 2.3 Prospecção Tecnológica

Diversas pesquisas têm sido realizadas na área de resíduos sólidos urbanos e obtenção de energia. No entanto, na era da informação, um desafio frequente é a lacuna entre o desenvolvimento da tecnologia e a sua compreensão por parte da sociedade. Para além do conhecimento tecnológico, a aplicação de novas alternativas também exige uma compreensão clara da adequação das tecnologias à realidade das diferentes situações e mercado, e sobretudo como compete com outras técnicas, caso já esteja em uso.

A prospecção tecnológica refere-se à integração de informações no processo de gestão da tecnologia, visando antecipar possíveis cenários futuros. Em termos gerais, os exercícios de prospecção têm como principais objetivos e benefícios potenciais: compreender as forças que direcionam o futuro; antecipar e compreender o curso das mudanças; orientar a tomada de decisões em ciência, tecnologia e inovação; apoiar decisões relacionadas à definição de prioridades em pesquisa e desenvolvimento; gerenciar riscos em inovações tecnológicas; melhorar a competitividade de produtos e processos; estruturar sistemas de inovação alinhados com os interesses da sociedade; identificar oportunidades e necessidades significativas para pesquisas futuras e facilitar a disseminação de informações estratégicas para a inovação por meio de canais e linguagens comuns (LADEIRA, 2013).

Atualmente coexistem muitas formas de analisar o futuro e suas consequências – dos quais Criatividade, Métodos Descritivos e Matrizes, Métodos Estatísticos, Opinião de Especialistas, Monitoramento e Sistemas de Inteligência, Modelagem e Simulação, Cenários, Análises de Tendências, e Sistemas de Avaliação e Decisão constituem-se em alguns exemplos. Segundo Santos *et al.* (2004), Monitoramento e Sistemas de Inteligência

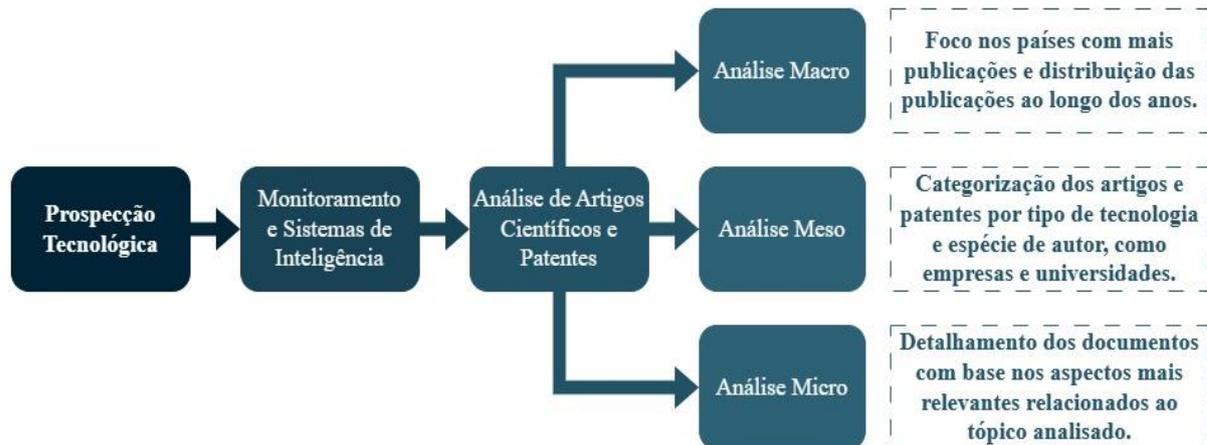
[...] constituem fontes básicas de informação relevante e por isso são comumente utilizados em estudos prospectivos. Monitorar significa observar, checar e atualizar-se em relação aos desenvolvimentos numa área de interesse, definida para uma finalidade bem específica. [...] As principais fontes em que se baseia são as de natureza técnica (revistas, patentes, catálogos, artigos científicos etc.).

A análise de patentes parte da premissa de que o crescente interesse por novas tecnologias resulta em maior atividade de pesquisa e desenvolvimento, refletindo-se no aumento dos depósitos de patentes. Por outro lado, a análise de artigos científicos se baseia no conceito de que a relevância dos avanços tecnológicos é refletida na atenção que recebem da mídia especializada ou geral. Portanto, ao rastrear o número de referências em bases de dados

ao longo do tempo, é possível prospectar a evolução, direção, natureza e velocidade das mudanças (SANTOS *et al.*, 2004).

Ao analisar um tópico com base em artigos científicos e patentes, pode-se realizar uma análise qualitativa e quantitativa dividida em três níveis: macro, meso e micro, conforme Figura 13.

Figura 13 – Detalhamento das análises de prospecção tecnológica realizadas nesse trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

### 2.3.1 Análise de Artigos Científicos e Patentes

A construção de um futuro mais sustentável é influenciada por diversos fatores, incluindo o desenvolvimento científico e tecnológico. Parte desse desenvolvimento é apresentado à sociedade através da publicação e divulgação de artigos científicos e patentes.

Artigos científicos são textos que apresentam os principais resultados de uma pesquisa acadêmica e são tipicamente publicados em revistas científicas. Esses artigos seguem um formato mais conciso e direto, frequentemente adotando uma abordagem crítica em relação às ideias discutidas. A escrita de artigos científicos visa registrar e disseminar os resultados de pesquisas específicas, oferecendo discussões sobre ideias, tecnologias e métodos em várias áreas do conhecimento. Isso contribui para trazer novos esclarecimentos sobre tópicos em debate na comunidade acadêmica, além de tornar possível o conhecimento, questionamento e a avaliação desse trabalho por outros profissionais (ARAÚJO, 2021).

Uma maneira adicional de avaliar o progresso tecnológico de um tópico específico é através da análise de patentes. De acordo com o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI, 2021), órgão brasileiro responsável pela regulamentação da concessão de patentes, uma patente é definida como:

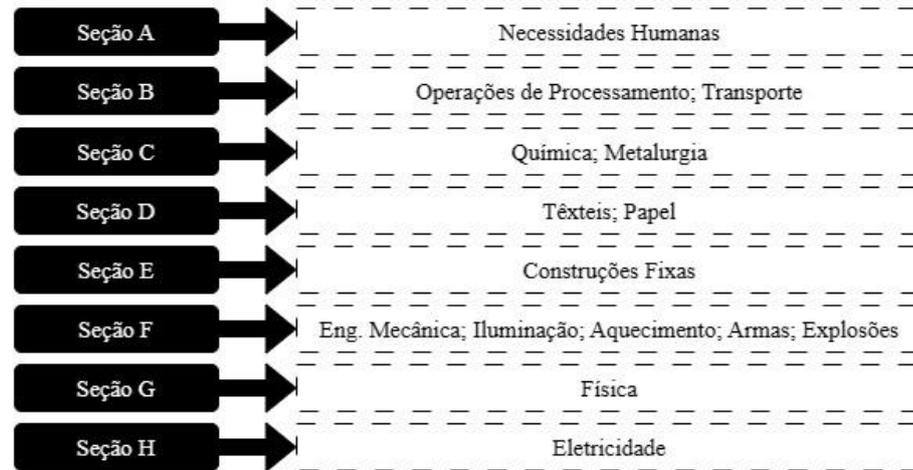
[...] um título de propriedade temporário, oficial, concedido pelo Estado, por força de lei, ao seu titular ou seus sucessores (pessoa física ou pessoa jurídica), que passam a possuir os direitos exclusivos sobre o bem, seja de um produto, de um processo de fabricação ou aperfeiçoamento de produtos e processos já existentes, objetos de sua patente. Terceiros podem explorar a patente somente com permissão do titular (mediante uma licença).

Conforme estipulado na Lei Nº 9.279, de 14 de maio de 1996, que regulamenta os direitos e obrigações relacionados à propriedade industrial, é estabelecido em seu artigo 40º um período de vigência de 20 anos para a exploração exclusiva de uma tecnologia patenteada como invenção, e de 15 anos para aquelas classificadas como modelo de utilidade (GONÇALVES; BEZERRA, 2018).

De acordo com Silva *et al.* (2015), esse tipo de mecanismo de proteção de mercado assegura uma defesa contra a concorrência direta e estabelece uma barreira legal para a entrada de possíveis novos competidores, permitindo a criação de uma "zona de monopólio" onde se pode definir seus preços. Além disso, a concessão de patentes também promove investimentos em pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, incentivando os pesquisadores e empresas a direcionar seus esforços em prol do crescimento econômico, da melhoria dos padrões de vida e da busca da prosperidade para toda a sociedade.

A *International Patent Classification* (IPC - Classificação Internacional de Patentes), em vigor desde 1968, estabelece uma classificação padronizada para patentes de invenção. Essa classificação é amplamente utilizada internacionalmente, proporcionando uma abordagem uniforme na categorização dos documentos. Seu principal objetivo é facilitar a busca eficiente de documentos de patentes por parte de escritórios especializados e outros usuários, permitindo a identificação de novidades e a avaliação do caráter inventivo nos pedidos de patentes (OMPI, 1999). A IPC representa a totalidade do conhecimento relevante para o campo de patentes e é dividida em oito seções, conforme Figura 14.

Figura 14 – Seções da Classificação Internacional de Patentes

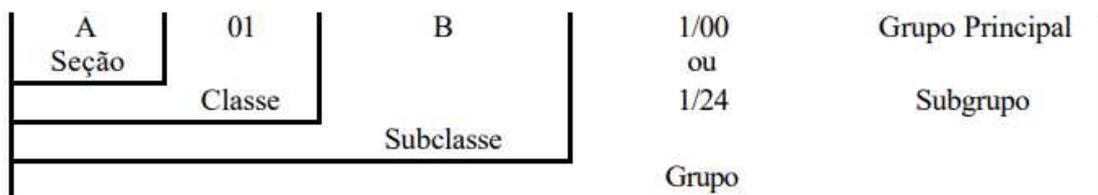


Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Ao se utilizar a IPC, é necessário saber que a matéria técnica de uma invenção não tem limites estabelecidos e que um invento pode receber mais de uma classificação ou tantas quantas forem necessárias. Um símbolo completo da IPC compreende os símbolos combinados que representam a seção, a classe, subclasse e o grupo principal ou o subgrupo (OMPI, 1999). Na Figura 15, apresenta-se o exemplo A 01 B 1/24, onde:

- a) seção: A - Necessidades Humanas;
- b) classe: 01 - Agricultura; Silvicultura; Pecuária; Caça; Captura em Armadilhas; Pesca;
- c) subclasse: B - Trabalho do solo em agricultura ou silvicultura; Peças, detalhes ou acessórios de máquinas ou Implementos agrícolas em geral;
- d) grupo principal: 1/00 - Implementos manuais;
- e) subgrupo: 1/24 - Implementos manuais para tratamento de prados ou gramados.

Figura 15 – Exemplo de símbolo completo da IPC



Fonte: Organização Mundial da Propriedade Intelectual (1999).

Patentes e artigos científicos são fontes de referência quando se trata de inovação e podem ser empregados para avaliar o avanço de um assunto específico. Um artigo científico desempenha o papel de uma literatura de referência que confirma pesquisas já realizadas e inspira potenciais estudos futuros. Sendo uma fonte confiável de informação original, ele serve como um veículo para compartilhar o conhecimento gerado por pesquisadores.

Paralelamente, é amplamente reconhecido internacionalmente que o número de patentes é um dos indicadores mais relevantes para avaliar a capacidade de um país de transformar o conhecimento gerado na esfera científica em tecnologias que possam ser utilizadas pela sociedade (ARAÚJO, 2021).

Com base em artigos científicos e patentes pode-se realizar uma análise qualitativa e quantitativa com o objetivo de avaliar o estado da arte de um campo tecnológico. Assim, as informações atuais são enriquecidas, convertendo-as em conhecimento para apoiar a formulação de estratégias e a identificação de direções e oportunidades futuras, a fim de embasar a tomada de decisões.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como propósito detalhar o método empregado para a coleta de dados que fundamentam e validam este estudo. Serão abordados todos os aspectos metodológicos da pesquisa realizada, descrevendo os procedimentos necessários e relevantes para conduzir uma investigação de prospecção tecnológica relacionada ao aproveitamento de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Esse estudo tem natureza básica e utiliza uma abordagem qualitativa e quantitativa para atingir seus objetivos. Uma pesquisa descritiva foi conduzida com o objetivo de caracterizar os artigos e patentes acerca do aproveitamento energético de RSU. Para a obtenção dos dados necessários, foi empregado o método de monitoramento tecnológico.

#### 3.1 Monitoramento Tecnológico de Artigos

A busca por artigos científicos foi realizada por meio da coleção principal da base de dados *Web of Science*. De acordo com a empresa Clarivate (2023), essa base pesquisa em mais de 55 milhões de registros nos principais periódicos, atas de congressos e livros de ciências, ciências sociais, artes e ciências humanas para identificar os estudos mais relevantes. A *Web of Science* é uma ferramenta atualizada semanalmente que possibilita, além da pesquisa convencional por termos no registro, a busca por artigos relacionados e a criação de conexões entre artigos que fazem referência a outros ou são referenciados por outros.

A pesquisa realizada foi restrita ao título, o que significa que todas as palavras-chave procuradas precisavam estar presentes no título de um documento para ser incluído neste estudo. Embora a base de artigos da *Web of Science* permita a pesquisa em resumos e até mesmo no documento completo, a experiência demonstra que essa opção aumenta consideravelmente o número de documentos encontrados, ao passo que reduz significativamente a relevância em relação ao tema de interesse, portanto, essa opção foi descartada.

O levantamento não impôs restrições temporais, abrangendo todos os artigos disponíveis desde os primeiros registros na base até os divulgados durante a realização dessa pesquisa (novembro de 2023).

Após estabelecer o escopo da busca e o intervalo temporal, foram testadas várias combinações de palavras-chave, com avaliação dos resultados obtidos.

A primeira estratégia executada utilizou os seguintes parâmetros:

- a) palavra-chave 1: “*municipal solid waste*”;
- b) operador de pesquisa: AND;
- c) palavra-chave 2: “*waste-to-energy*” OR “*energy from waste*” OR “*waste to energy*”.

Com isso, a pesquisa resultante atendeu o formato mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Primeira estratégia utilizada na pesquisa de artigos científicos

Q “**municipal solid waste**” (Título) and “**waste-to-energy**” OR “**energy from waste**” OR “**waste to energy**” (Título)

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Para a seleção das palavras-chave, o termo “resíduos sólidos urbanos” foi traduzido para sua expressão em inglês mais comum, “*municipal solid waste*”. Adicionalmente, foram empregadas as expressões em inglês “*waste-to-energy*” e “*energy from waste*”, amplamente utilizadas na geração de energia a partir de resíduos. Usou-se também o operador *booleano* OR, com o objetivo de ampliar a pesquisa sem a obrigatoriedade de que as expressões aparecessem em conjunto.

Para aprimorar a precisão da busca, as aspas foram empregadas, resultando apenas em artigos que continham a expressão como um todo, e não suas palavras isoladas. Devido ao uso de aspas, incluiu-se também a expressão “*waste to energy*”, uma vez que esse termo poderia ser escrito sem a utilização do hífen. Além disso, foi utilizado o operador de pesquisa AND para restringir a busca a artigos que necessariamente continham os dois conjuntos de palavras-chave mencionados.

Na primeira estratégia executada, identificou-se um número muito reduzido de artigos científicos. Devido a esse resultado, a segunda estratégia de busca testou a alteração dos caracteres de truncamento, retirando o uso das aspas e adicionando o asterisco. O asterisco permite a busca por variações da palavra, abrangendo, por exemplo, “*solid*” e “*solids*”. Além disso, as expressões foram desmembradas, e sinônimos foram explorados. O termo “*municipal solid waste*”, por exemplo, foi pesquisado utilizando as seguintes palavras-chave: residencial, doméstico, urbano ou municipal.

A base de dados também oferece opções de operadores para impor a ordem das palavras ou estabelecer uma quantidade máxima de palavras entre elas, podendo ser zero, o que exigiria que as palavras aparecessem obrigatoriamente uma após a outra.

Na prática, verificou-se que a utilização desses operadores não aumentava a relevância dos resultados obtidos e, portanto, não foram empregados. Portanto, conforme Figura 17, a segunda estratégia utilizou os seguintes parâmetros:

- a) palavra-chave 1: solid\*;
- b) operador de pesquisa 1: AND;
- c) palavra-chave 2: waste\*;
- d) operador de pesquisa 2: AND;
- e) palavra-chave 3: resident\* OR domestic\* OR urban\* OR municipal\*;
- f) operador de pesquisa 3: AND;
- g) palavra-chave 4: energ\* OR electricity\*.

Figura 17 – Segunda estratégia utilizada na pesquisa de artigos científicos

Q solid\* (Título) and waste\* (Título) and resident\* OR domestic\* OR urban\* OR municipal (Título) and energ\* OR electricity\* (Título)

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Essa estratégia se mostrou altamente eficiente, abrangendo expressões comuns na literatura, como "recuperação energética" (*energy recovery*) e "resíduo para energia" (*waste to energy*). Além disso, engloba mais de um tipo de energia, incluindo elétrica e térmica, ao mesmo tempo que exclui documentos pouco relevantes. Em seguida, foi realizada a leitura exploratória dos títulos e resumos dos artigos, a fim de identificar se todos os estudos abordavam o tratamento de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético.

A análise dos dados obtidos foi conduzida em três níveis de aprofundamento e refinamento: macro, meso e micro. Na análise macro, foram examinados o ano, o país e o continente de publicação dos artigos. Na análise meso, foram considerados os tipos de autor e áreas de pesquisa. Já na análise micro, foram exploradas as principais palavras-chave identificadas nos artigos.

### 3.2 Monitoramento Tecnológico de Patentes

A pesquisa de patentes foi realizada tendo por referência os documentos depositados na base de dados *Derwent Innovations Index*, que pode ser acessada através da plataforma *Web of Science*. Segundo a empresa Clarivate (2023), a *Derwent Innovations Index* é a ferramenta mais abrangente na cobertura e análise de patentes globais, sendo atualizada semanalmente, além de englobar mais de 80 milhões de inovações práticas, desde 1963 até a

atualidade. As informações patenteadas são reunidas de 59 autoridades emissoras de patentes em todo o mundo e categorizadas em três áreas: Química, Engenharia e Elétrico e Eletrônica.

Semelhantemente à busca dos artigos científicos, no monitoramento tecnológico das patentes, nenhum período de tempo foi delimitado e foram buscados os termos descritos no campo de pesquisa título.

No levantamento foram utilizados como palavras-chave os termos em inglês “*solid*”, “*waste*”, “*residente*”, “*domestic*”, “*urban*”, “*municipal*”, “*energ*” e “*electricity*”, além dos operadores *booleanos* AND e OR, associando os termos ao uso de asteriscos, assim como na segunda estratégia do monitoramento tecnológico de artigos científicos.

Em resumo, os critérios utilizados no monitoramento tecnológico de patentes foram:

- a) intervalo temporal: não delimitado, inclui todas as patentes depositadas até a data de realização desta pesquisa;
- b) campo de pesquisa: título;
- c) palavras-chave: (solid\*) AND (resident\* OR domestic\* OR urban\* OR municipal\*) AND (energ\* OR electricity\*) AND (waste\*).

A pesquisa correspondente é mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Estratégia utilizada na pesquisa de patentes

Q solid\* (Título) and resident\* OR domestic\* OR urban\* OR municipal\* (Título) and energ\* OR electricity\* (Título) and waste\* (Título)

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Em seguida, realizou-se uma leitura dos títulos e resumos das patentes e foram selecionadas somente as que tratavam de produtos ou processos voltados para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, uma vez que, muitas vezes, os termos apareciam numa composição explicativa de tecnologias que não eram de interesse deste estudo.

Foram pesquisadas as variáveis ano de depósito, idioma, titularidade da patente, tipo de invenção, tipo de depositante, tipo de tecnologia e Classificação Internacional de Patentes (IPC). Dividindo essas análises nos níveis macro, meso e micro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a prospecção tecnológica de artigos científicos e patentes acerca do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

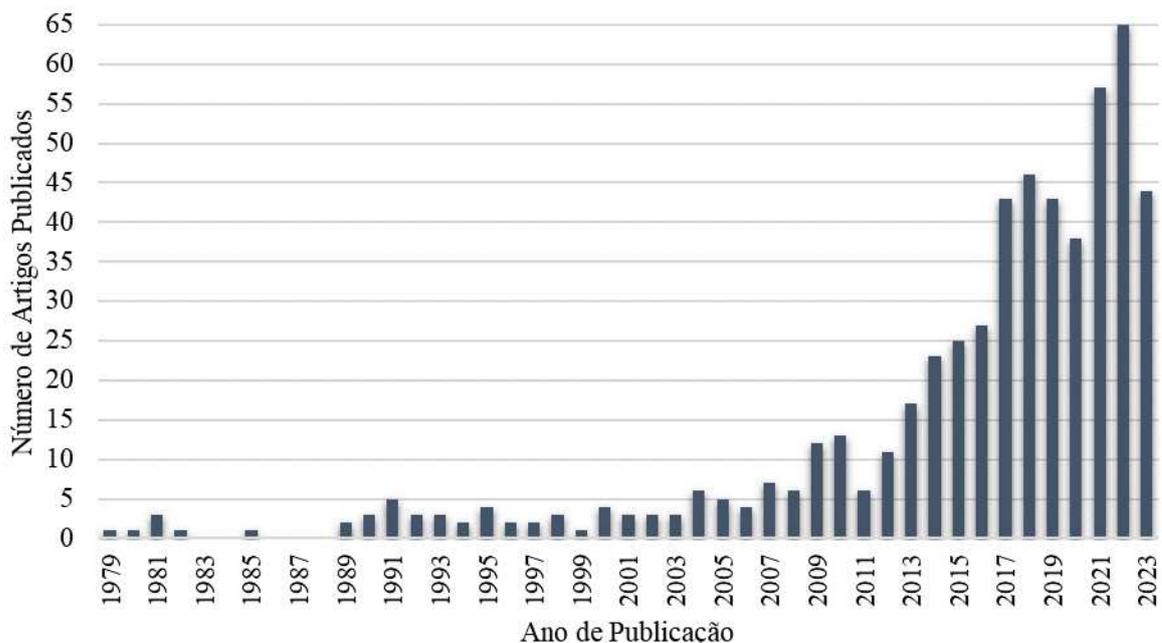
### 4.1 Monitoramento Tecnológico de Artigos

No monitoramento tecnológico utilizando a base de dados *Web of Science*, foram localizados na primeira estratégia de pesquisa apenas 84 artigos. Devido ao número reduzido, foi realizada uma segunda estratégia de pesquisa, conforme descrito na metodologia, resultando em 548 artigos científicos. Com essa base de estudos, realizou-se as análises macro, meso e micro apresentadas a seguir.

#### 4.1.1 Análise Macro

Na primeira análise realizada, apresentada no Gráfico 5, levou-se em conta o ano de publicação dos artigos científicos. Nota-se uma evolução temporal do número de publicações.

Gráfico 5 – Número de artigos científicos publicados por ano\*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

\* Nos anos 1983, 1984, 1986, 1987 e 1988, não foi publicado nenhum artigo, dos 548 analisados sobre o tema.

O crescente interesse em pesquisas sobre aproveitamento energético de RSU ao longo dos anos pode ser atribuído à vários fatores, sendo eles: crescente conscientização ambiental, necessidade de fontes alternativas de energia, desenvolvimento tecnológico e urgência para reduzir os impactos ambientais oriundos da disposição inadequada de RSU. Ademais, percebe-se uma curva de crescimento mais acentuada a partir de 2005, que, além dos fatores já apresentados, pode estar associada ao intercâmbio global de conhecimento científico facilitado pela comunicação digital e redes acadêmicas, que contribui para a disseminação e compartilhamento de descobertas, incentivando mais pesquisadores a contribuir com a área.

Além disso, analisou-se o número de publicações por país, os dados são apresentados no Gráfico 6. Dos 548 artigos selecionados, 28 não possuíam informação de país de origem, sendo desconsiderados nesta análise. A soma total de artigos por país foi de 927, excedendo o número de artigos selecionados devido à contribuição de autores de diferentes países em um mesmo artigo.

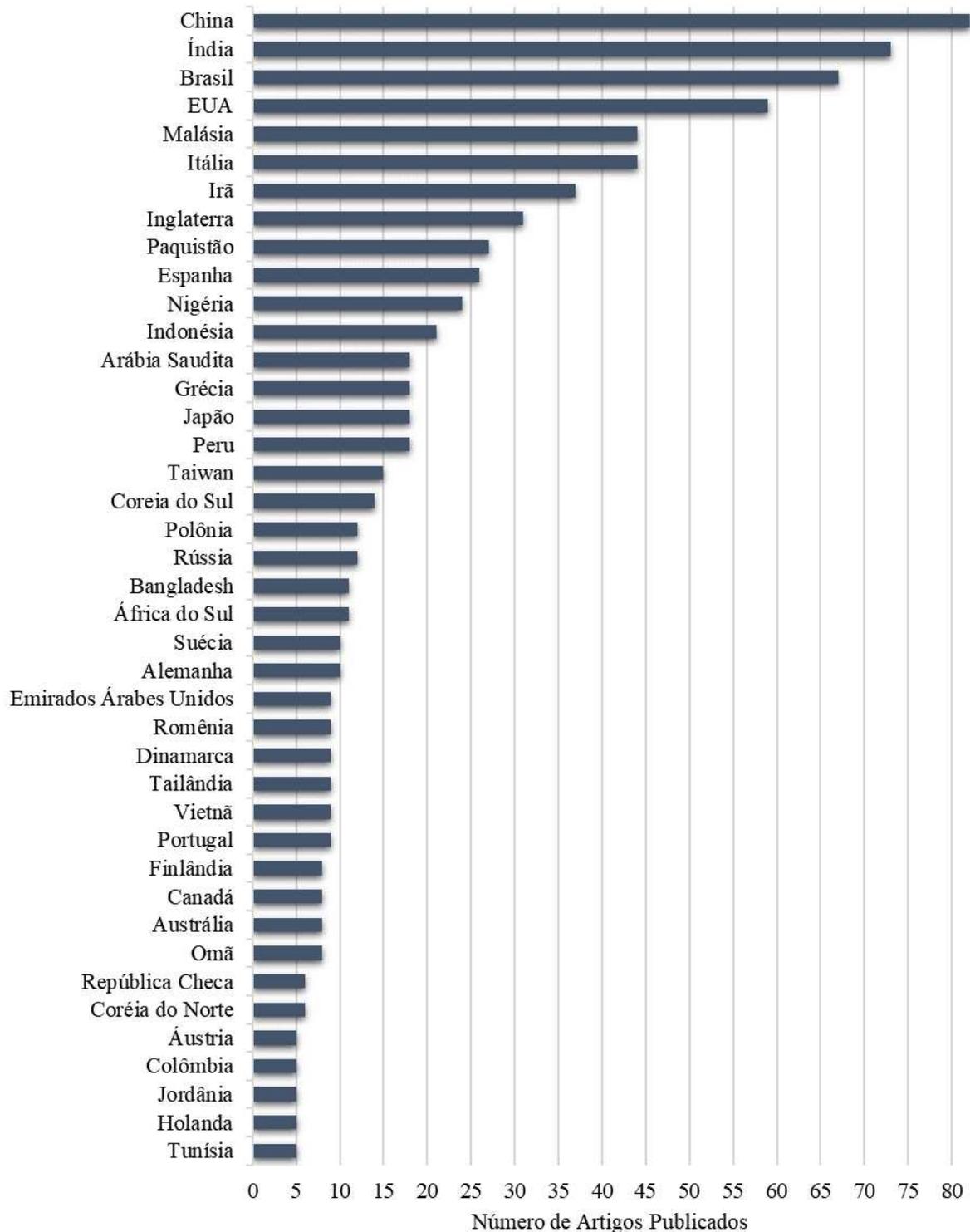
Foram encontrados artigos acerca do aproveitamento energético de RSU em 90 países diferentes. Para melhor visualização, no Gráfico 6 são apresentados apenas 41 países, que detêm 89% das publicações, com 5 ou mais artigos cada. Os países com maior número de publicações são China (82), Índia (73), Brasil (67) e Estados Unidos (59). Os países que não aparecem no gráfico são:

- a) 4 artigos publicados: Palestina, Uganda, Cuba, Marrocos, França, Líbano e Gana;
- b) 3 artigos publicados: Hungria, Etiópia, Chile, Noruega, Iraque, Maurício, Croácia, Equador, Quênia e Bulgária;
- c) 2 artigos publicados: Cazaquistão, Catar, Cingapura, Panamá, Filipinas, Eslováquia, Argélia, México, Sérvia, Lituânia, Irlanda, Camboja e Egito;
- d) 1 artigo publicado: Malawi, Letônia, Bielorrússia, Kuwait, Fiji, Uzbequistão, Sri Lanka, Geórgia, Suíça, Peru, Sudão, Nova Zelândia, Afeganistão, Zimbábue, Bélgica, Síria, Mongólia, Líbano e Eslovênia.

A China se sobressai como o país com o maior volume de artigos, contando com 82 estudos publicados. Essa predominância pode ser atribuída à considerável expansão da prática de incineração de RSU observada no país ao longo da última década (ARAÚJO, 2021). Além disso, vale ressaltar que a China abriga cerca de 18% da população global, contando com aproximadamente de 1,4 bilhão de habitantes (ONU, 2022). Desde 1978, com a reforma econômica, o país conquistou notável destaque no cenário econômico mundial, evidenciado

por avanços significativos no Produto Interno Bruto (PIB), que figura entre os mais elevados globalmente, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (GONÇALVES; BEZERRA, 2018).

Gráfico 6 – Número de artigos científicos publicados por país com 5 ou mais publicações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

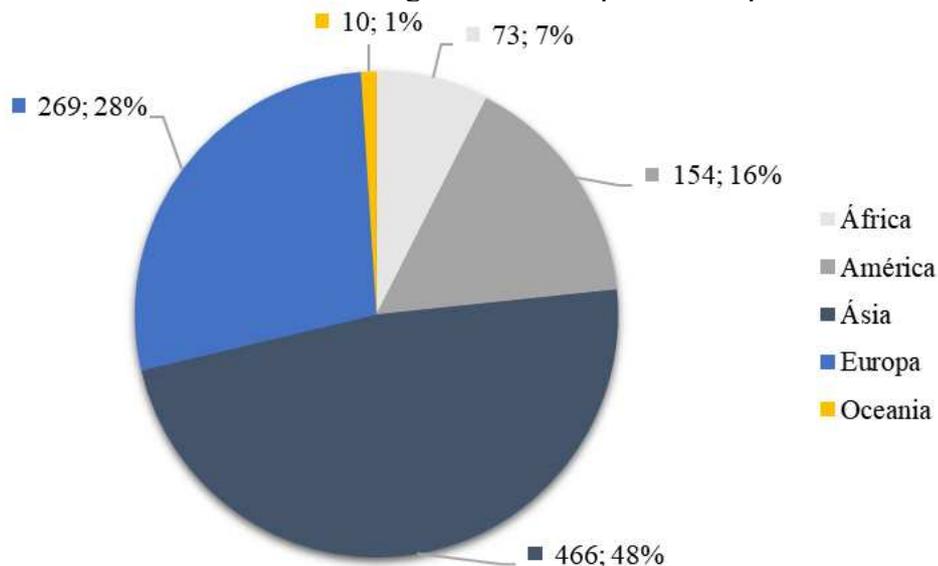
A Índia aparece como segundo país com maior quantidade de artigos publicados. As cidades indianas figuram entre os maiores produtores de resíduos globalmente, gerando

aproximadamente 62 milhões de toneladas por ano. Apenas cerca de 82% desse total é recolhido, e 28% passa por processos de tratamento. A maioria desses resíduos acaba em aterros sanitários, lixões a céu aberto ou, em alguns casos, é simplesmente descartada no solo, frequentemente obstruindo rios e sistemas de drenagem (BLOOMBERG, 2018). Esses fatores aliados aos impactos à saúde e ao meio ambiente decorrentes da destinação inadequada dos RSU e a alta densidade demográfica do país, que conta com cerca de 18,1% da população mundial (ONU, 2022), explicam o crescente investimento em novos estudos acerca do aproveitamento energético de RSU.

Os resultados revelam ainda um contínuo esforço de pesquisa no Brasil, com 67 pesquisas publicadas, evidenciando o interesse na área, uma vez que a utilização de tecnologias para o reaproveitamento de resíduos com fins energéticos ainda se encontra em estágios iniciais no país. Os Estados Unidos (EUA) ocupam a quarta posição na lista dos países com maior número de publicações científicas. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de os EUA serem líderes mundiais em ciência, tecnologia e inovação.

Na análise de número de artigos científicos por continente, o número total de publicações foi maior que a soma de artigos por país, pois países como Rússia, Turquia, Geórgia, Egito, Jordânia e Cazaquistão fazem parte de mais de um continente. Obteve-se 48% dos artigos sendo publicados por países da Ásia, 28% da Europa e 16% da América, de acordo com o Gráfico 7.

Gráfico 7 – Número e % de artigos científicos publicados por continente



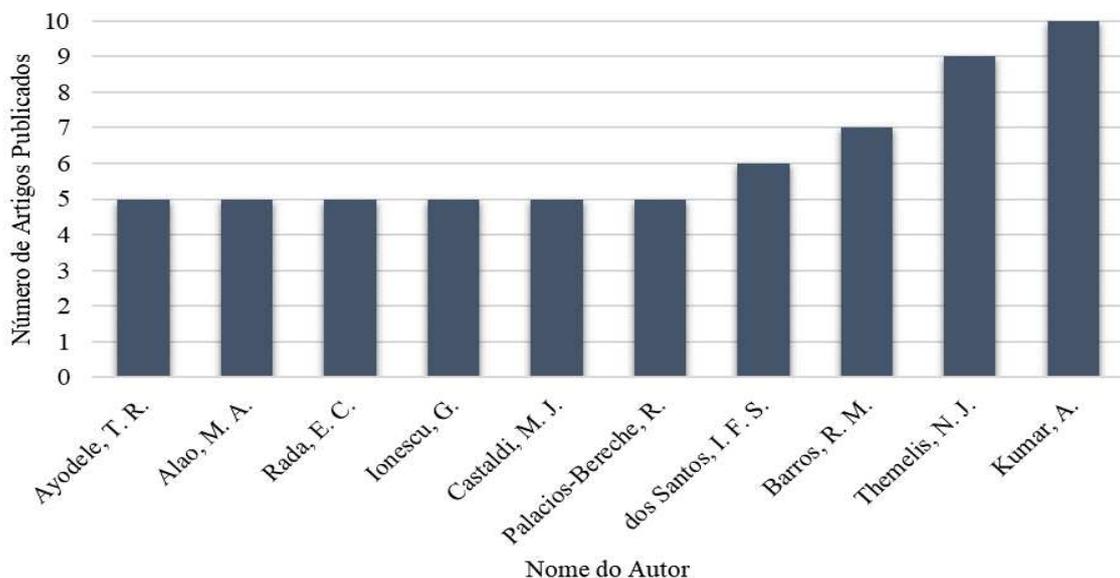
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os países da Ásia estão sendo liderados pela China e Índia, que são as nações mais avançadas no assunto, conforme descrito anteriormente. Após o continente asiático, tem-se a Europa com 269 artigos científicos publicados. As maiores contribuições são decorrentes dos países Itália, Inglaterra e Espanha, comprovando o que foi explicitado na revisão bibliográfica, onde se percebe uma tendência dos países do continente europeu em reduzir a quantidade de resíduos disposta em aterros e priorizar a incineração, a reciclagem e os tratamentos biológicos.

#### 4.1.2 Análise Meso

Na análise de autoria, observou-se que os artigos apresentavam em média três a quatro autores por publicação. Foram localizados 1828 autores distintos nos 548 artigos científicos. Do montante de 1828, apenas dez autores publicaram mais de quatro artigos acerca do aproveitamento energético de RSU, conforme apresentado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Número de artigos científicos publicados por autor com 5 ou mais publicações

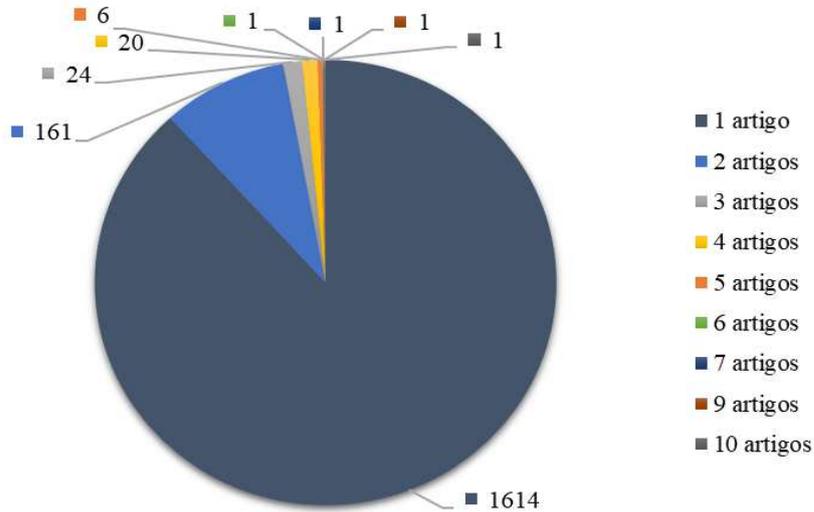


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisou-se ainda a quantidade de autores por número de artigos publicados. Como pode ser visto no Gráfico 9, 88% dos autores publicaram apenas 1 artigo, 9% publicaram 2 artigos e o restante publicou de 3 a 10 artigos sobre a conversão de resíduos sólidos urbanos em energia. Esse comportamento pode ser atribuído ao interesse pelo assunto ser relativamente novo, com muitas linhas de pesquisa, mas ainda sem um consenso sobre as

melhores tecnologias. Como resultado, tem-se muitos pesquisadores começando a explorar o tema, ocasionando apenas um ou dois artigos publicados por autor.

Gráfico 9 – Quantidade de autores por número de artigos científicos publicados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

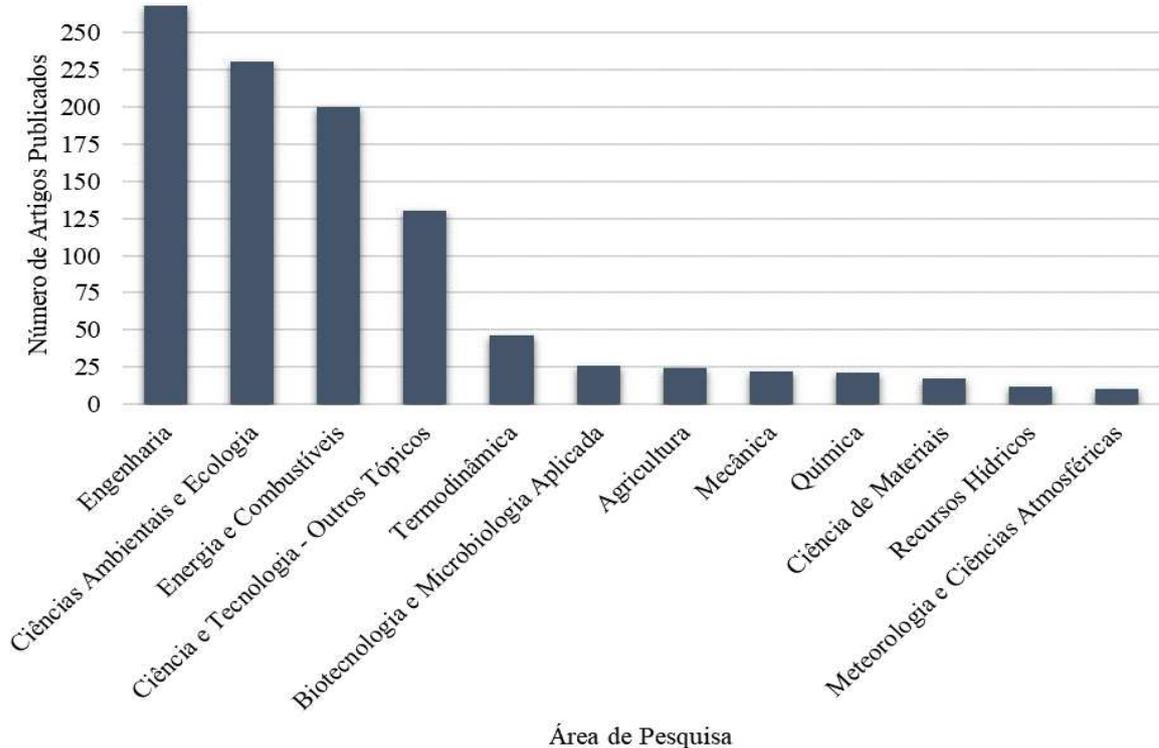
Na análise do tipo de instituição, dos 548 artigos, 72 não possuem informação de afiliação. As universidades ganham destaque com a publicação em conjunto com empresas, institutos e centros de pesquisa, contribuindo em 437 das 476 publicações. Ao todo, as universidades aparecem em 92% das publicações selecionadas. Como centros de excelência em pesquisa e ensino, espera-se que possuam acesso à recursos e financiamento para realizar pesquisas de alta qualidade. Além disso, essas instituições possuem um corpo docente qualificado e experiente em diversas áreas, o que é importante para o desenvolvimento de pesquisas multidisciplinares. Os institutos e academias também apresentam destaque em relação a quantidade de artigos publicados, com participação, respectivamente, em 13% e 3% das publicações de artigos sobre o tema.

Em seguida, analisou-se a área de pesquisa dos artigos. No total, obteve-se 38 áreas de pesquisas distintas, com algumas publicações apresentando até 5 áreas de pesquisa diferentes em um mesmo artigo. No Gráfico 10 são apresentadas apenas as áreas de pesquisa que possuem 10 ou mais artigos publicados acerca da transformação de RSU em energia.

Nota-se uma predominância de quatro áreas, sendo elas: Engenharia; Ciências Ambientais e Ecologia; Energia e Combustíveis; e Ciência e Tecnologia - Outros Tópicos. Juntas, essas áreas de pesquisa aparecem em 77% dos artigos científicos analisados, refletindo uma abordagem interdisciplinar e abrangente dos estudos e aplicações de soluções para utilização de RSU como fonte de energia. Alguns fatores que podem explicar essa

predominância são: adoção de abordagem técnica relacionada aos processos de conversão, eficiência energética e tecnologias de tratamento; preocupação em reduzir os impactos ambientais gerados pelos RSU; ênfase na busca por fontes de energia alternativas e foco em inovação científica e tecnológica no desenvolvimento e análise de novas abordagens.

Gráfico 10 – Número de artigos científicos publicados por área de pesquisa com 10 ou mais publicações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

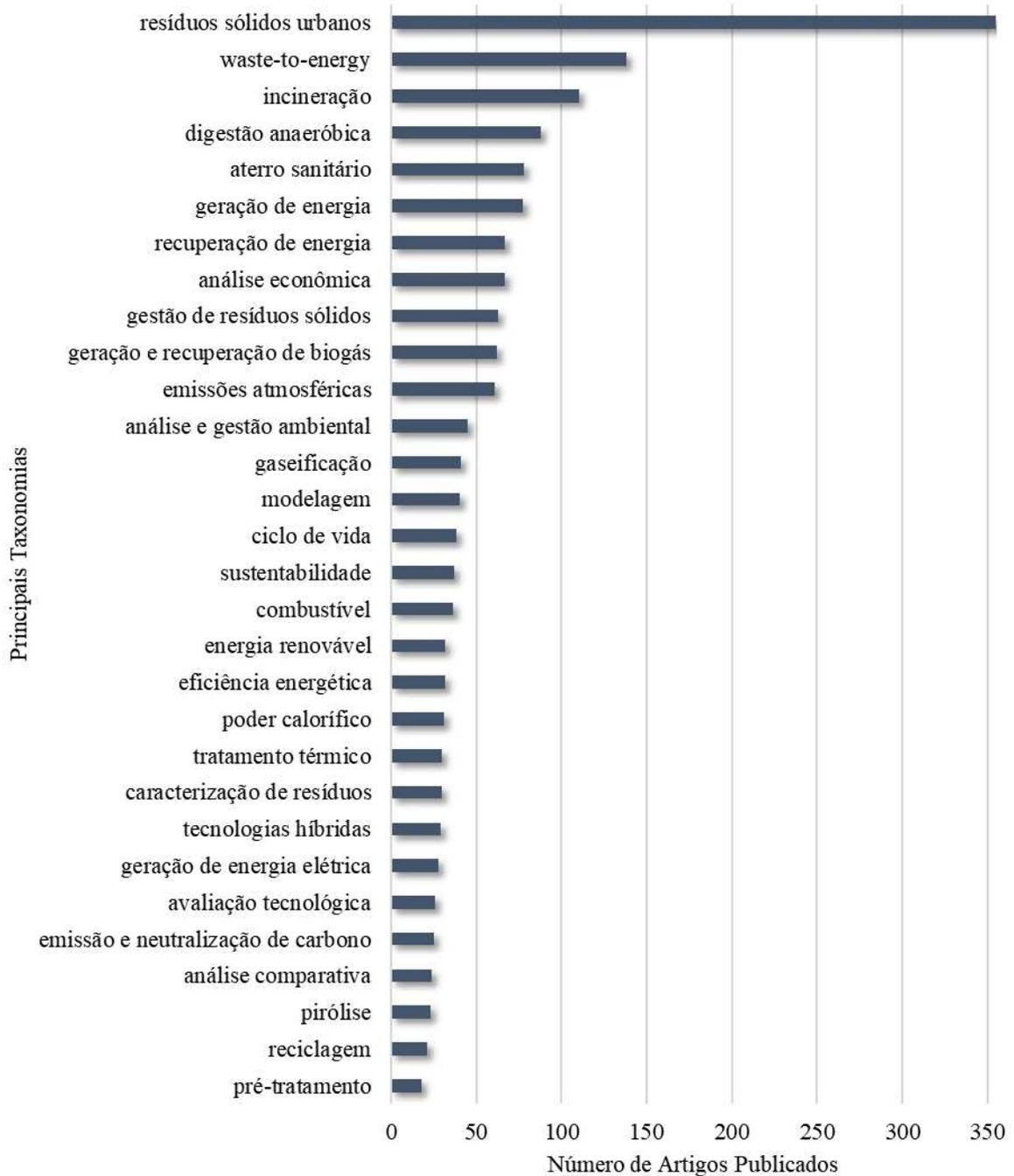
#### 4.1.3 Análise Micro

Na análise detalhada, foram examinadas as principais taxonomias presentes nos artigos científicos por meio do agrupamento de palavras-chave semelhantes. Dos 548 artigos inicialmente selecionados, 92 foram excluídos dessa análise por não apresentarem palavras-chave. O número total de taxonomias na análise micro ultrapassa o número de artigos selecionados, refletindo a prática comum de incluir múltiplas palavras-chave em artigos científicos.

Como indicado no Gráfico 11, duas taxonomias predominantes emergiram: “resíduos sólidos urbanos” e “*waste-to-energy*”. Esses resultados validam a eficácia da seleção de artigos, pois estão alinhados com o tema desse trabalho. Além disso, merece destaque o uso frequente das palavras incineração, digestão anaeróbica e aterro sanitário,

sugerindo que essas tecnologias são foco proeminente na produção científica. A análise também revela uma presença significativa de taxonomias relacionadas à geração de energia e à redução de impactos ambientais, ampliando a compreensão das tendências e enfoques na pesquisa sobre aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

Gráfico 11 – Número de artigos científicos publicados por principais taxonomias



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 4.2 Monitoramento Tecnológico de Patentes

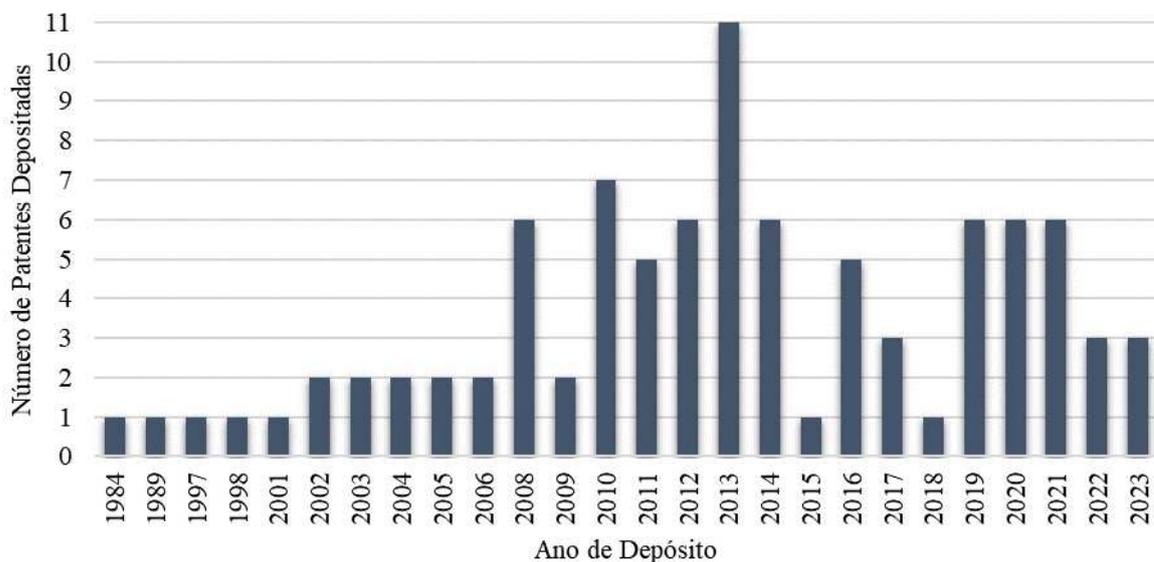
No monitoramento tecnológico de patentes, inicialmente, foram localizadas 116 patentes, no entanto, 24 delas foram consideradas irrelevantes para o estudo. A análise foi realizada não apenas no título e resumo dos documentos, mas também no conteúdo das patentes, uma vez que o resumo nem sempre fornece informações suficientes sobre o tema abordado. Patentes que não tratavam da geração de energia a partir de RSU ou que não mencionavam RSU foram excluídas da análise.

Em seguida realizou-se nas 92 patentes restantes, as análises de número de publicações por ano de depósito, idioma, tipo de invenção, titularidade, tipo de depositante, tipo de tecnologia e Classificação Internacional de Patentes (IPC).

### 4.2.1 Análise Macro

O Gráfico 12 mostra a evolução das invenções sobre tratamento de RSU no banco de patentes *Derwent Innovations Index*.

Gráfico 12 – Número de patentes depositadas por ano\*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

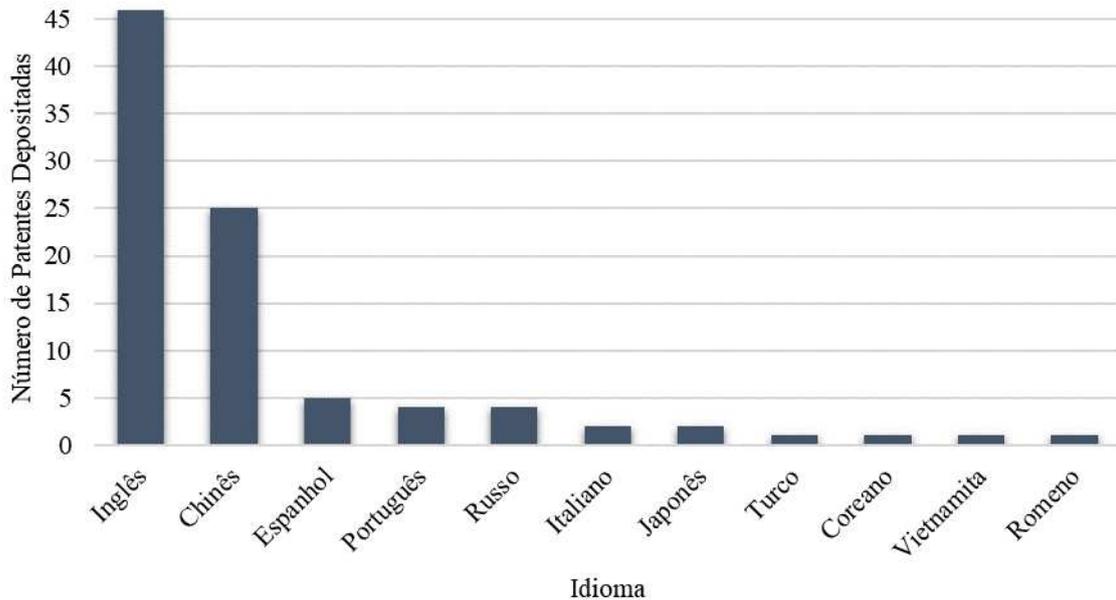
\* Nos anos 1985, 1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000 e 2007 nenhuma patente foi depositada, do total de 92 sobre o tema.

O avanço da população, do consumo e da obsolescência dos produtos industrializados são fatores que provavelmente contribuíram para o crescimento do número de patentes ao longo dos anos. Somado a isso, com o aumento da quantidade de resíduos sólidos

gerados, a demanda por soluções para o tratamento desses resíduos também se intensificou. Devido ao fenômeno conhecido como efeito de borda, verifica-se uma redução nos anos de 2022 e 2023. Esse efeito pode ser atribuído à diferentes razões: a) atraso na publicação dos pedidos de patente pelos órgãos oficiais; b) período de sigilo de 18 meses a partir da data de depósito até a divulgação do pedido de patente; e c) demora na atualização da base comercial ao incorporar dados provenientes das fontes oficiais dos escritórios de patente.

Avaliou-se também o número de patentes depositadas por idioma, visto que a base de patentes utilizada não fornecia a informação de país de origem. Percebe-se uma predominância dos idiomas inglês e chinês, totalizando 77% dos depósitos de patentes acerca da conversão de RSU em energia, conforme Gráfico 13.

Gráfico 13 – Número de patentes depositadas por idioma



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Essa predominância pode ser atribuída à dois principais fatores. No cenário mundial, o inglês é amplamente reconhecido como o principal idioma de comunicação científica e tecnológica, logo, a preferência pelo inglês reflete que os depositantes das patentes visam alcançar uma audiência internacional. Somado a isso, tanto os Estados Unidos (onde o inglês é predominante) quanto a China têm sido líderes em pesquisa e desenvolvimento, especialmente em tecnologias ambientais e energéticas, resultando em uma maior produção de patentes nesses idiomas.

A China, em particular, tem experimentado um notável avanço tecnológico e industrial. Em 2008, o país alcançou a posição de segundo maior produtor global de

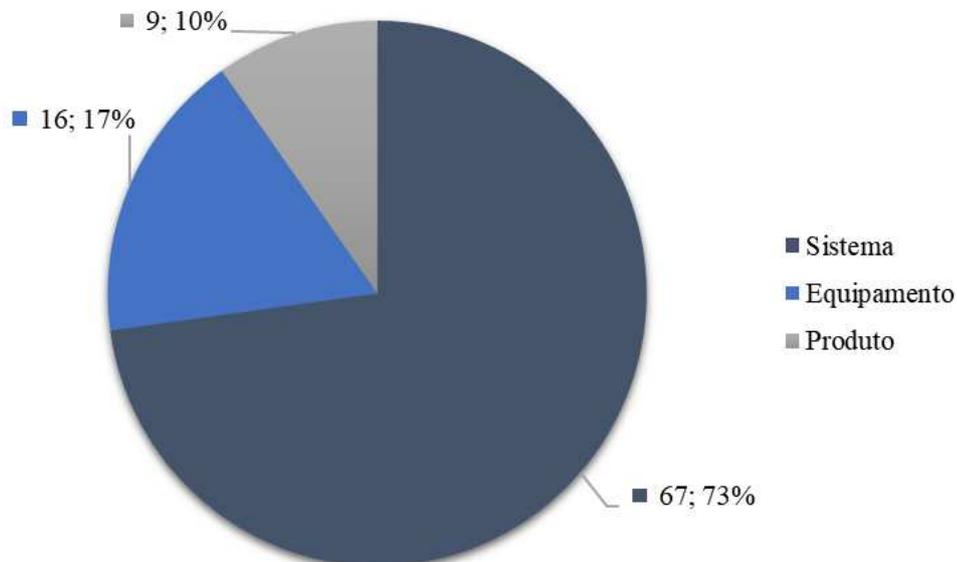
conhecimento científico, evidenciado pelo volume de artigos publicados em revistas científicas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (GONÇALVES; BEZERRA, 2018).

#### 4.2.2 Análise Meso

Na análise meso das patentes depositadas, iniciou-se avaliando o tipo de invenção abordada, podendo ser sistema, equipamento ou produto. Como pode ser visto no Gráfico 14, 73% das patentes se referem à sistemas de tratamento de RSU, focadas principalmente em melhorias dos processos ou descrição de plantas completas para conversão de RSU em energia. Em seguida, tem-se 17% das patentes abordando a criação ou aprimoramento de equipamentos específicos utilizados no tratamento dos resíduos.

Em menor quantidade, apenas 9 patentes, são apresentados produtos obtidos através das tecnologias de aproveitamento energético. Isso sugere que a ênfase está mais na eficiência do processo e nos avanços dos métodos de tratamento do que na diversificação dos produtos finais, refletindo a fase inicial de desenvolvimento dessas tecnologias.

Gráfico 14 – Número e % de patentes depositadas por tipo de invenção

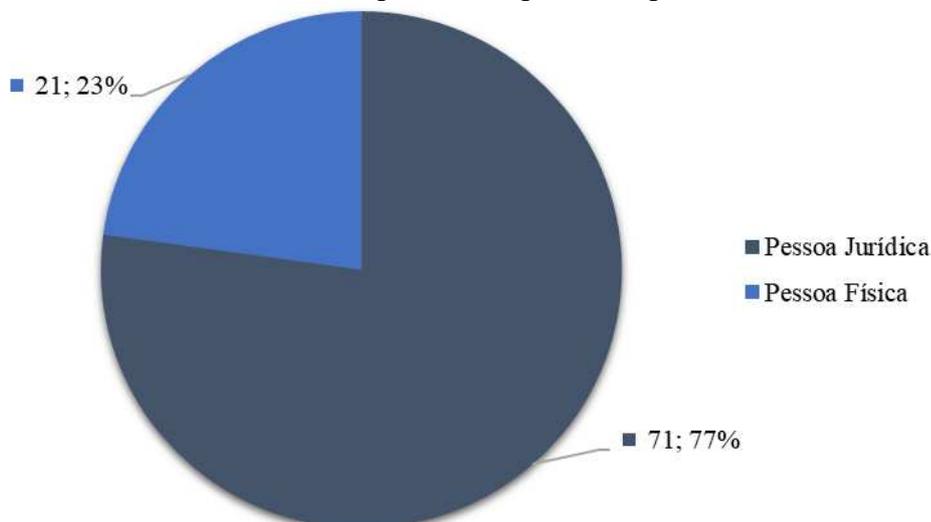


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Quanto à titularidade das patentes, observou-se que 77% foram depositadas por pessoas jurídicas, conforme o Gráfico 15. Segundo Silva *et al.* (2015), a lei de Propriedade Intelectual estabelece que apenas o autor (inventor) ou seus herdeiros têm o direito de apresentar um pedido de patente. No entanto, ressalva que, devido às disposições de contratos de trabalho ou prestação de serviços, a posse da invenção pode ser transferida pelo inventor

para uma empresa, instituição de pesquisa ou outra entidade física ou jurídica, contribuindo para o comportamento observado no gráfico.

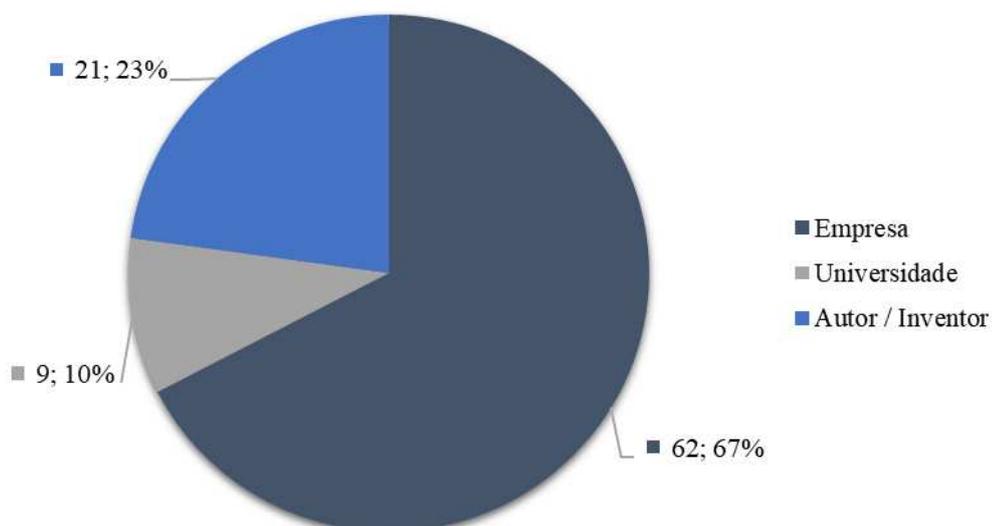
Gráfico 15 – Número e % de patentes depositadas por titularidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em relação à análise pelo tipo de depositante, mostrada no Gráfico 16, observa-se que a maior parte das patentes são de empresas, com 67% do total de documentos depositados. Esse resultado indica a importância de fortalecer a integração entre empresas e universidades, que detêm apenas 10% das patentes, dado que as universidades são as principais detentoras de conhecimento, conforme visto na análise de distribuição dos artigos científicos por tipo de autor. Logo, a colaboração com as empresas seria mutuamente benéfica, possibilitando um significativo avanço nas tecnologias de conversão de RSU em energia.

Gráfico 16 – Número e % de patentes depositadas por tipo de depositante

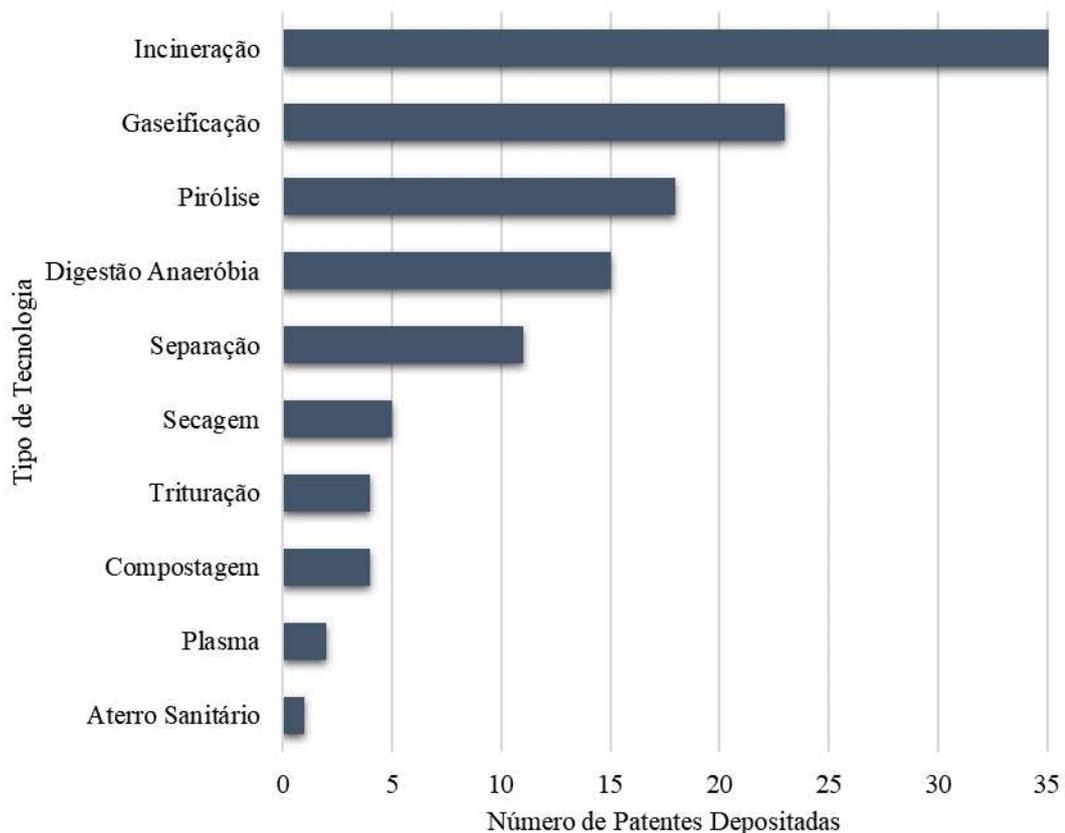


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao analisar as patentes segundo o tipo de tecnologia, a soma total ultrapassa o número de patentes selecionadas, pois alguns documentos descrevem sistemas híbridos que incorporam mais de um tipo de técnica. Conforme ilustrado no Gráfico 17, a incineração se destaca, estando presente em 35 das 92 patentes analisadas. Nos últimos anos, essa tecnologia tem sido amplamente difundida para o aproveitamento energético a partir de RSU. Em seguida, são observados outros tratamentos térmicos, como a gaseificação e a pirólise, com 23 e 18 patentes depositadas, respectivamente.

Em uma proporção menor, percebe-se a presença de tecnologias de pré-tratamento, como a separação, secagem e trituração de RSU. Esse dado destaca a relevância do pré-tratamento no aprimoramento da eficiência das tecnologias e na conversão eficaz dos resíduos em energia. Além disso, nota-se um número reduzido de patentes relacionadas à compostagem e ao aterro sanitário. Isso sugere que essas tecnologias possuem uma base científica consolidada e uma aplicação robusta, o que pode representar um desafio adicional para inovação e a criação de novas patentes.

Gráfico 17 – Número de patentes depositadas por tipo de tecnologia

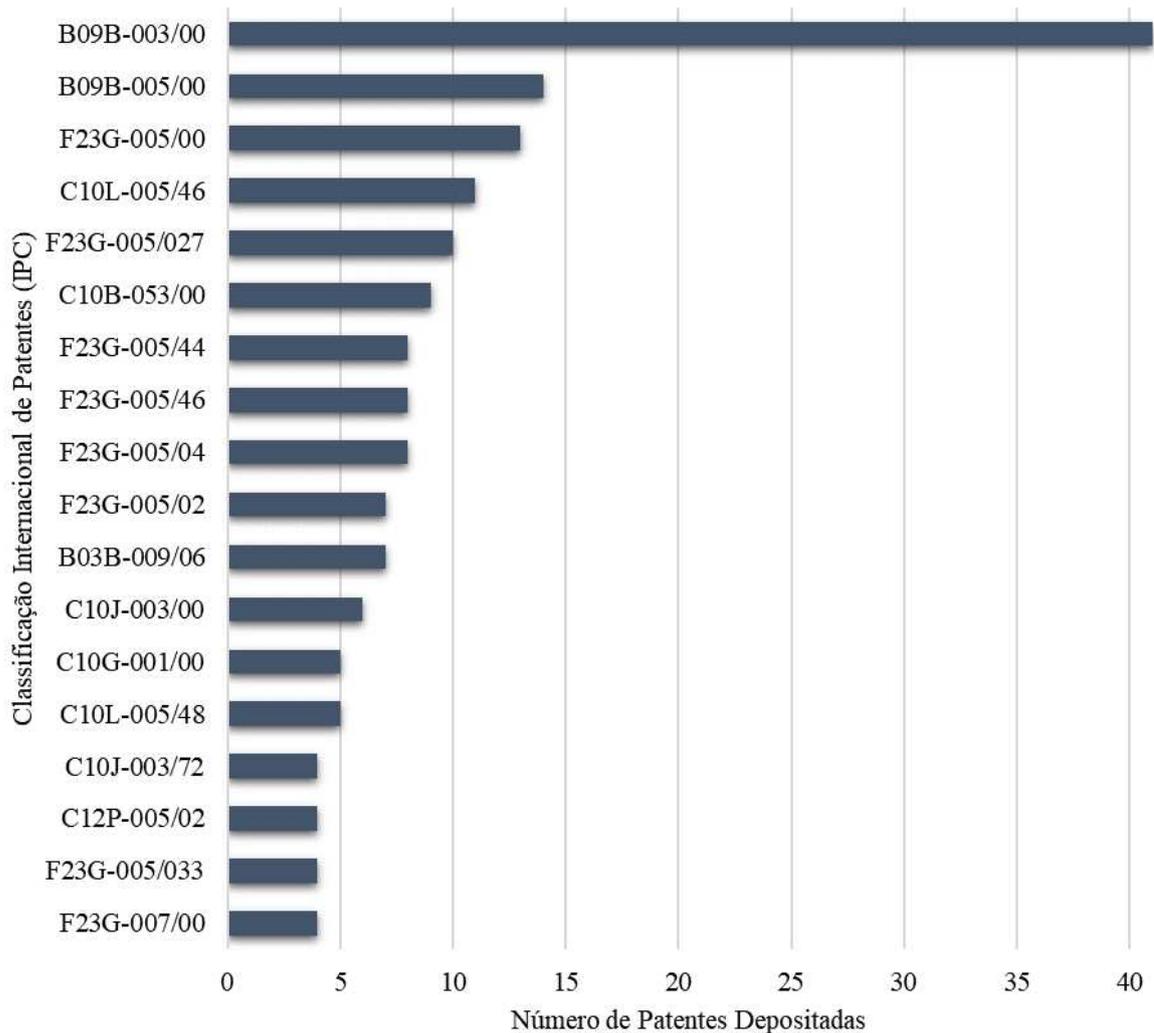


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 4.2.3 Análise Micro

Na análise micro, observou-se em média a presença de 4 a 5 classificações por patente, chegando à até 30 classificações em um único documento. Isso reflete o que foi exposto no referencial teórico, onde é apresentado que a matéria técnica de uma invenção não possui limites definidos, e um invento pode ser classificado em mais de uma categoria, conforme necessário. Devido a isso, o número total de classificações obtidas (434) supera a quantidade de classificações distintas (224) e a de patentes analisadas (92).

Gráfico 18 – Número de patentes depositadas por Classificação Internacional de Patentes



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No Gráfico 18, que ilustra a distribuição das Classificações Internacionais de Patentes para IPC com 4 ou mais patentes depositadas, destaca-se de forma significativa a categoria B09B-009/00, estando presente em notáveis 45% do total de documentos depositados. Essa classificação está associada à transformação de resíduos em algo

aproveitável. Em segundo lugar, encontra-se a categoria B09B-005/00, com 15%, relacionada à outras operações de eliminação de resíduos sólidos. Isso demonstra que a pesquisa obteve alta eficiência no processo de investigação, visto que se obteve patentes alinhadas com o tema de estudo.

Outras classificações de áreas diversas, mas intimamente relacionadas ao tema em questão, são apresentadas em menor proporção no Gráfico 18. Um exemplo notável é a classificação C10G-001/00, acerca da “produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos a partir de xisto betuminoso, areias betuminosas ou materiais carbonáceos sólidos não fundíveis ou similares, como madeira e carvão”. O uso dessa classificação pode ser atribuído ao reaproveitamento de resíduos sólidos através da sua transformação em combustível.

As demais classificações de patentes presentes no gráfico são descritas como:

- a) F23G-005/00: métodos ou dispositivos, por exemplo, incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade;
- b) C10L-005/46: combustíveis sólidos a partir de esgoto, resíduos domésticos ou urbanos;
- c) F23G-005/027: métodos ou aparelhos, como incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, pirolisando ou gaseificando.
- d) C10B-053/00: destilação destrutiva, especialmente adaptada para matérias-primas sólidas específicas ou matérias-primas sólidas em forma especial;
- e) F23G-005/46: métodos ou aparelhos, por exemplo, incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, com recuperação de calor.;
- f) F23G-005/44: métodos ou aparelhos, como incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, com detalhes e acessórios;
- g) F23G-005/04: métodos ou aparelhos, como incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, com secagem;
- h) F23G-005/02: métodos ou aparelhos, como incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, com pré-tratamento;

- i) B03B-009/06: arranjo geral de planta de separação, por exemplo, diagramas de fluxo especialmente adaptados para resíduos;
- j) C10J-003/00: produção de gases contendo monóxido de carbono e hidrogênio, por exemplo, gás de síntese ou gás de cidade, a partir de materiais carbonáceos sólidos por processos de oxidação parcial envolvendo oxigênio ou vapor;
- k) C10L-005/48: combustíveis sólidos a partir de resíduos industriais ou sólidos;
- l) F23G-007/00: métodos ou aparelhos, por exemplo, incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos específicos ou combustíveis de baixa qualidade, por exemplo, produtos químicos;
- m) F23G-005/033: métodos ou aparelhos, como incineradores, especialmente adaptados para a combustão de resíduos ou combustíveis de baixa qualidade, com cominuição ou trituração;
- n) C12P-005/02: preparação de hidrocarbonetos acíclicos.;
- o) C10J-003/72: produção de gases contendo monóxido de carbono e hidrogênio, por exemplo, gás de síntese ou gás de cidade, a partir de materiais carbonáceos sólidos por processos de oxidação parcial envolvendo oxigênio ou vapor, com outras características.

A presença dessas classificações de patentes indica uma diversidade de abordagens e métodos no âmbito das tecnologias de aproveitamento energético de RSU. Essas categorias abrangem desde métodos específicos de combustão, como incineradores adaptados para resíduos de baixa qualidade, até processos relacionados à produção de gases a partir de materiais carbonáceos sólidos e a preparação de combustíveis sólidos derivados de resíduos domésticos ou urbanos. A variedade de classificações reflete a complexidade e a amplitude das inovações e descobertas nesse campo, evidenciando a diversidade de abordagens acerca da conversão de resíduos sólidos urbanos em energia e produtos úteis.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um panorama das tecnologias relacionadas a resíduos sólidos urbanos e energia sob a ótica da publicação de artigos científicos e patentes, através da realização de um estudo de prospecção tecnológica.

Ao longo do trabalho, demonstrou-se o contexto nacional e mundial da gestão dos RSU. Foram abordadas as principais tecnologias de aproveitamento energético de resíduos, como incineração, aterro com captura de gás e compostagem, além de outras tecnologias térmicas e biológicas.

O estudo alcançou com êxito seus objetivos ao compreender o contexto dos RSU e a metodologia de prospecção tecnológica, além de realizar uma revisão abrangente da literatura sobre tecnologias de aproveitamento energético e conduzir um levantamento de artigos científicos e patentes pertinentes, avaliando o cenário das tecnologias por meio da prospecção tecnológica. Os resultados confirmam a eficácia da abordagem metodológica, fornecendo insights valiosos sobre as tendências e desafios no campo do aproveitamento energético de RSU.

Em um cenário contemporâneo marcado pela rapidez nas pesquisas e avanços tecnológicos, a competitividade e a habilidade de apresentar estratégias inovadoras tornam-se cruciais para a tomada de decisão e a diferenciação de empresas e governos. Logo, fica evidente que a prospecção tecnológica contribui para a análise das tecnologias de aproveitamento energético de RSU, abrindo caminho para o desenvolvimento de novos produtos e processos. Ao basear-se em conhecimentos já estabelecidos, essa abordagem amplia a capacidade de avançar em direção a uma visão estratégica, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O monitoramento tecnológico de artigos científicos e patentes proporcionou insights significativos e conclusões relevantes para o campo. Ao longo dos anos, observou-se um aumento expressivo nas publicações, indicando uma crescente atenção e pesquisa dedicada ao tema. Fatores como conscientização ambiental, a busca por fontes alternativas de energia e os avanços tecnológicos desempenham papéis cruciais nesse crescimento. A participação global foi evidente, com diversos países contribuindo para a evolução do conhecimento, sendo a China uma destacada líder em número de publicações, colaborando tanto para a construção de conhecimento científico na área, quanto para o desenvolvimento prático de tecnologias de conversão de resíduos em energia.

A diversidade de tecnologias analisadas reflete a complexidade do campo, com sistemas de tratamento de RSU sendo a categoria mais prevalente. A incineração se destaca como a tecnologia mais amplamente explorada. Através das análises realizadas, percebeu-se a importância de uma parceria estreita entre instituições acadêmicas e empresas para impulsionar inovações nas tecnologias de conversão de RSU em energia. As áreas de pesquisa predominantes nos artigos científicos, como Engenharia, Ciências Ambientais e Energia, refletem uma abordagem interdisciplinar nos estudos, destacando a amplitude do tema.

A análise detalhada das patentes revelou não apenas uma evolução temporal das invenções, mas também a predominância dos idiomas inglês e chinês. Além disso, as tecnologias patenteadas, como incineração, gaseificação e pirólise, indicam um foco inicial na eficiência do processo. Nota-se que o cenário do aproveitamento energético de RSU é dinâmico, diversificado e repleto de desafios e oportunidades. As tendências identificadas neste trabalho oferecem um guia valioso para futuras pesquisas e inovações, visando não apenas a eficiência das tecnologias existentes, mas também a exploração de novos caminhos e soluções inovadoras.

Este estudo evidenciou a importância da prospecção tecnológica como ferramenta indispensável para o conhecimento atualizado sobre o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram identificadas algumas oportunidades e sugestões para estudos futuros dentro da temática, visando contribuir para o avanço da pesquisa científica e o entendimento das novas tecnologias de tratamento de resíduos, como:

- a) ampliação do presente trabalho a partir da prospecção tecnológica utilizando outras bases de dados, visto que a complementaridade das informações de fontes distintas pode enriquecer a compreensão global e fortalecer a confiabilidade dos resultados obtidos;
- b) elaboração de um estudo prospectivo focado em sistemas híbridos de plantas de aproveitamento energético a partir de RSU, dada a crescente relevância desses sistemas;
- c) avaliação técnica e econômica da aplicação das tecnologias abordadas neste trabalho, pois esse tipo de análise fornece informações fundamentais para tomada de decisões práticas e investimentos, favorecendo a implementação efetiva e economicamente viável dessas tecnologias;

d) estudo do impacto das políticas públicas de gestão de resíduos na implementação de tecnologias de aproveitamento energético de RSU, uma vez que, dessa forma, seria possível obter uma visão abrangente das interações entre regulamentações governamentais e a eficácia das tecnologias, contribuindo para estratégias mais alinhadas e eficientes.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 25 out. 2023.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 24 out. 2023.
- ARAÚJO, G. F. **Geração de bioenergia a partir de RSU**: um estudo de prospecção tecnológica. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BELCHIOR, Y. S. A. Gestão dos RSU tem sido um dos grandes desafios da humanidade. **Biosphere World**, 2019. Disponível em: <https://movimentobw.org.br/noticias/exibir/gestao-rsu-grandes-desafios-humanidade>. Acesso em: 05 nov. 2023.
- BLOOMBERG, B. P. **Cidade da Índia transforma montanha de lixo em dinheiro**. Exame, 2018. Disponível em: <https://exame.com/mundo/cidade-da-india-transforma-montanha-de-lixo-em-dinheiro/>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2008) **Resolução CONAMA nº. 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2008. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.
- BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 1998.
- BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2007.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2010.
- CASTRO, F. B. P.; SOUZA A. V. **Política de resíduos sólidos é um marco abrangente**. Consultor Jurídico, 2010. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2010-ago-19/politica-nacional-residuos-solidos-marco-regulatorio-abrangente>. Acesso em: 06 nov. 2023.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**, 2018. São Paulo, 2018.

CLARIVATE Analytics. **Products & Services**. 2023. Disponível em: <https://clarivate.com/products/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. 1999. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Livro\\_Compostagem.pdf](http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Livro_Compostagem.pdf). Acesso em: 09 out. 2023.

FGV - Fundação Getúlio Vargas. **Política Nacional e Gestão Municipal de Resíduos Sólidos**. 2015. FGV Projetos. Rio de Janeiro, 2015.

GALDINO, S. J.; MARTINS, C. H. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na coleta convencional de um município de pequeno porte**, 2016. Tecnológica. Santa Cruz do Sul, RS, v. 20, n. 1, p. 01-08, 2016.

GOMES, T. M. A. **Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos: uma Revisão da Literatura**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Campus de Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018.

GONÇALVES, L. A. S; BEZERRA, J. S. **Estudo Prospectivo do Processo Tecnológico da Pirólise com Ênfase no Programa de Patentes Verdes do INPI**. Cad. Prospec., v. 11, n. 1, p.74-86, Salvador, 2018.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma Abordagem Tecnológica**. 2004. Tese (Mestrado em Ciências) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Intelectual. **Manual Básico para Proteção por Patentes de Invenções, Modelos de Utilidade e Certificados de Adição**. Ministério da Economia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes/guia-basico/ManualdePatentes20210706.pdf>. Acesso em: 08 out. 2023.

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Intelectual. **Radar Tecnológico INPI: Mapeamento das patentes de tecnologias relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos e líquidos depositadas no Brasil**, 2022. Rio de Janeiro, 2022.

ISWA - Associação Internacional de Resíduos Sólidos. **O Futuro do Setor de Gestão de Resíduos: Tendências, Oportunidades e Desafios para a Década [2021-2030]**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/wp-content/uploads/2022/08/O-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos-ISWA-2022.pdf>. Acesso em: 06 out. 2023.

LADEIRA, N. C. **Estudo Prospectivo de Tecnologias para Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LEME, M. M. V. **Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2010.

LIMA, J. D. **Modelos de Apoio à Decisão para Alternativas Tecnológicas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MANNARINO, C. F. *et al.* **Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Europeia**. 2016. Eng. Sant. Ambient., v. 21, n. 2, 2016.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**, 2003. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) –Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2003.

MOURA, C. M. *et al.* **Gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos: uma responsabilidade do poder público e de toda a coletividade**, 2017. Trabalho apresentado na XVIII Jornada de Extensão. Rio Grande do Sul, 2017.

MULLER, L. N. P. S.; ARRUDA, J. B. F.; HILUY FILHO, J. J. Potencial de usinas *waste to energy* no nordeste brasileiro: projeção e análise comparativa de impactos na esfera ambiental e no setor energético. **Revista Produção Online**. Florianópolis, SC, v. 18, n. 4, p. 1374-1397, 2018.

NASCIMENTO NETO, P. **Resíduos Sólidos Urbanos: Perspectivas de gestão intermunicipal em regiões metropolitanas**. São Paulo: Atlas, 2013.

OMPI - Organização Mundial da Propriedade Intelectual. **Classificação Internacional de Patentes**. 7º ed. v10. Grã Bretanha, 1999.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Revisão das Perspectivas da População Mundial 2022**. Ministério dos Assuntos Económicos e Sociais, Divisão da População, 27º ed. 2022.

PAVAN, M. C. O. **Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Energia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PLANARES - Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Ministério do Meio Ambiente**. Brasília, 2022. 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: 20 set. 2023.

QUEZADO, L. H. N. **Avaliação de Tecnologias para Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2010. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SANTOS, G. O.; MOTA, F. S. B. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares de Fortaleza/CE dispostos no aterro sanitário de Caucaia/CE**, 2010. Rev. Tecnol. Fortaleza. v. 31, n. 1, p. 30-50. Fortaleza/CE, 2010.

SANTOS, L. H. M. *et al.* Os resíduos sólidos urbanos no Brasil e a política nacional de resíduos sólidos – Lei nº 12.305/2010. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**. v.16, n.2. Três Corações/MG, 2018.

SANTOS, M. M. *et al.* **Prospecção de tecnologias de futuro: métodos, técnicas e abordagens**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Parcerias Estratégicas, Número 19. Brasília, 2004.

SCHALCH, V. *et al.* **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. 2002. Apostila - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVA, J. B. *et al.* **Prospecção Tecnológica no Tratamento de Resíduos Sólidos**. 2015. Trabalho apresentado no Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2015, Fortaleza.

SILVA, V. D. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2016.

SILVA, V. P. M.; CAPANEMA, L. X. L. **Políticas Públicas na Gestão de Resíduos Sólidos: Experiências Comparadas e Desafios para o Brasil**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, BNDES, v. 25, p. 153-200, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA SOBRINHO, L. H. R. **Estudo para Aplicação da Tecnologia de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: um Estudo de Caso para o Município de Magé/RJ**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

SIMÕES, A. L. G. *et al.* **Panorama geral dos resíduos sólidos urbanos no âmbito mundial**. 2019. Trabalho apresentado no 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade (CONRESOL). Foz do Iguaçu, 2019.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: Visão Geral - ano de referência 2021**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

SZIGETHY, L; ANTENOR, S. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 2020.

TOLMASQUIM, M. As origens da crise energética brasileira. **ANPPAS - Revista Ambiente e Sociedade**. São Paulo, SP, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2000000100012>. Acesso em: 23 out. 2023.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, England, 2005.