



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

ISRAEL SARAIVA ALVARENGA

JOÃO PESSOA  
SETEMBRO/2025

ISRAEL SARAIVA ALVARENGA

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Ruy Portela de Vasconcelos

JOÃO PESSOA – PB  
SETEMBRO/2025

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A473r Alvarenga, Israel Saraiva.

Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos:  
uma revisão sistemática / Israel Saraiva Alvarenga. -  
João Pessoa, 2025.

53 f. : il.

Orientação: Cláudio Ruy Portela de Vasconcelos.  
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Recuperação energética. 2. waste to energy. 3.  
Web of Science. 4. bibliometria. I. Vasconcelos,  
Cláudio Ruy Portela de. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 624(043.2)

# FOLHA DE APROVAÇÃO

ISRAEL SARAIVA ALVARENGA

## RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 01/10/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:

*Cláudio Ruy Portela de Vasconcelos*

Cláudio Ruy Portela de Vasconcelos  
Orientador

Departamento de Engenharia de Produção/UFPB

*Aprovado*

(Aprovado/Reprovado)

*Cláudia Coutinho Nóbrega*

Cláudia Coutinho Nóbrega

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPB

*APROVADO*

(Aprovado/Reprovado)

*Alessandra Berenguer Moraes*

Alessandra Berenguer Moraes

Departamento de Engenharia de Produção/UFPB

*Aprovado*

(Aprovado/Reprovado)

Documento assinado digitalmente

gov.br

ALINE FLÁVIA NUNES REMÍGIO ANTUNES

Data: 04/10/2025 15:03:30-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes Coordenadora  
do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por seu infinito amor e sacrifício por meio de Jesus Cristo, a partir do qual somos reconciliados com Ele, possibilitando, aos que creem, a vitória sobre a morte. Sem Deus eu não teria conseguido terminar este ciclo.

Aos meus pais, Antônio Júnior Ibiapina Alvarenga e Jakeline Torres Saraiva Alvarenga, os pais que Deus escolheu para me guiar nos caminhos do Senhor durante a jornada na Terra. Muito obrigado por todo o amor e apoio durante todos esses anos. Sou muito grato também pela vida do meu irmão Emanuel Saraiva Alvarenga, o caçula da casa.

Quero agradecer ao meu orientador professor Cláudio Ruy Portela de Vasconcelos, cujas orientações e dicas foram fundamentais para a escrita deste trabalho, e às professoras Claudia Coutinho Nóbrega e Alessandra Berenguer Moraes por terem aceitado o convite para participar da banca.

Agradeço também aos amigos que participaram, de uma forma ou de outra, desta jornada e de diversos momentos na UFPB e fora também. Desta forma, gostaria de mencionar Brian Tavares, Danilo Régis, Rodrigo Passos, Ayrton Morato, Kennet Anderson, Gabriel Marques, Sávio Veríssimo e Maria Clara.

Também agradeço a todos os professores dos quais fui aluno, em especial o professor Hamilcar José Almeida Filgueira, um profissional diferenciado e que realmente ama o que faz; e Elisângela Maria Rodrigues Rocha, de quem fui aluno no início e no final do curso e que me orientou no relatório de estágio.

Quero deixar a minha gratidão pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, empresa onde tive o prazer de estagiar por um ano. Carinho especial tenho por todos os colegas com quem trabalhei na Gerência de Meio Ambiente – GEMA. Por serem muitos, menciono Maribel Roque, Carolina Baracuhy, Fernando Pereira, Diórgenes, Roseane e Lucas Gomes. Em nome destes, os agradecimentos se estendem a todos os outros.

Por fim, agradeço também às secretárias do curso Cinara Leite e Maria Silvia, sempre prestativas e prontas para tirar as minhas inúmeras dúvidas sobre os processos burocráticos da universidade.

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna.”

João 3:16

## RESUMO

O crescimento econômico e populacional no mundo, tem contribuído significativamente para o aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), com os lixões e aterros controlados ainda sendo a destinação de uma boa parte do total global, causando inúmeros impactos ambientais e contribuindo para as mudanças climáticas. A problemática das mudanças climáticas também possui como causa preponderante, a grande dependência dos combustíveis fósseis, causando o agravamento pela emissão de poluentes na atmosfera. Assim, as tecnologias *Waste to Energy*, que visam a recuperação energética dos RSU, apontam para uma alternativa de gestão que abrange a esfera ambiental, energética e socioeconômica. Na busca pela diversificação da matriz de energia, essa opção de destinação de RSU possui uma relevância ainda maior, ajudando, inclusive, na redução das emissões de gases de efeito estufa. Dada a relevância do tema, o presente trabalho realiza uma revisão sistemática, a partir do método da bibliometria, para identificação de eixos temáticos, principais autores, periódicos, palavras-chave utilizadas e artigos relevantes, no período de 2020 a 2025, junto com as tecnologias WtE utilizadas nestes estudos. Para isso foi utilizada a base de dados *Web of Science* (WoS) para a pesquisa dos artigos, e os softwares Excel e *VOSviewer* para a mapeamento, tratamento e visualização dos dados. No período analisado, foram publicados 816 artigos na área. A palavra-chave mais repetida foi “*waste to energy*”, já com relação às tecnologias de conversão de RSU em energia, a que mais se repetiu foi “*anaerobic digestion*”. Os periódicos com mais publicações foram *Energies*, *Journal of Cleaner Production* e *Sustainability*. Os 816 artigos contaram com 3.212 autores, sendo Abdulaziz Atabani o mais citado. A revisão sistemática dos artigos mais relevantes revelou a digestão anaeróbia como opção de tratamento que mais se repetiu. A gaseificação foi estudada, em dois trabalhos, em conjunto com programas de simulação, se revelando um eixo temático. A recuperação energética de RSU está bem associada com a preocupação ambiental, sendo necessário a compreensão de aspectos ambientais e socioeconômicos, da área de instalação para potencializar os benefícios da tecnologia adotada.

**Palavras-chave:** Recuperação energética, *waste to energy*, *Web of Science*, bibliometria

## ABSTRACT

Global economic and population growth has significantly contributed to the increase in municipal solid waste (MSW) generation. A substantial share of this waste is still disposed of in open dumpsites and controlled landfills, which cause considerable environmental impacts and contribute to climate change. One of the predominant drivers of climate change is the high dependence on fossil fuels, which exacerbates the issue through pollutant emissions into the atmosphere. Within this context, Waste to Energy (WtE) technologies, designed to recover energy from MSW, emerge as a management alternative that simultaneously addresses environmental, energy, and socioeconomic dimensions. Furthermore, in the pursuit of diversifying the energy matrix, WtE solutions gain additional relevance, particularly for their potential to reduce greenhouse gas emissions. Given the importance of this subject, the present study undertakes a systematic review, applying bibliometric methods to identify thematic axes, leading authors, key journals, commonly used keywords, and the most relevant articles published between 2020 and 2025, alongside the WtE technologies employed in these studies. The Web of Science (WoS) database served as the source for article retrieval, while Excel and VOSviewer software were utilized for data mapping, processing, and visualization. During the analyzed period, 816 articles were published in the field. The most frequently used keyword was “waste to energy,” whereas, among MSW-to-energy conversion technologies, “anaerobic digestion” was the most recurrent. The journals with the highest number of publications were *Energies*, *Journal of Cleaner Production*, and *Sustainability*. Altogether, the 816 articles involved 3,212 contributing authors, with Abdulaziz Atabani standing out as the most frequently cited. The systematic review of the most relevant contributions highlighted anaerobic digestion as the predominant treatment option. Gasification was explored in two studies, in conjunction with simulation programs, emerging as a distinct thematic axis. Overall, the energy recovery of MSW is strongly aligned with environmental concerns, and a comprehensive understanding of both environmental and socioeconomic aspects of siting is essential to maximize the benefits of the adopted technology.

**Keywords:** Energy recovery, waste to energy, Web of Science, bibliometrics

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração per capita, em quilo, no Brasil em 2022 e 2023.....	19
Figura 2: Composição gravimétrica global dos RSU .....	20
Figura 3: Composição gravimétrica brasileira dos RSU.....	20
Figura 4: Processos de conversão térmica e seus produtos.....	26
Figura 5: Fluxograma das etapas metodológicas .....	28
Figura 6: Rede de coocorrência de palavras-chave baseada em <i>clusters</i> .....	31
Figura 7: Rede de coocorrência de palavras-chave baseada no ano médio das publicações ...	32
Figura 8: Rede de citações de periódicos.....	34
Figura 9: Maior conjunto de itens conectados da rede de coautoria.....	36
Figura 10: Rede de coautoria de todo o banco de dados.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais palavras-chave de cada cluster e seus números de ocorrência.....	33
Tabela 2: Periódicos com mais publicações relacionadas à recuperação energética de RSU .	35
Tabela 3: Autores mais citados .....	38
Tabela 4: Artigos mais relevantes, da base WoS, entre 2020 e 2025 .....	35

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ACV	Análise do ciclo de vida
GEE	Gases de efeito estufa
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
JIF	<i>Journal Impact Factor</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
PCS	Poder calorífico superior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SMARTER	<i>Simple Multi Attribute Rating Technique Exploiting Ranks</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to an Ideal Solution</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USD	<i>United States Dollar</i>
WoS	<i>Web of Science</i>
WtE	<i>Waste to Energy</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
\$	dólar
GJ	Gigajoules
GWh	gigawatt-hora
h	hora
J	Joule
kg	quilo
kJ	quilojoules
kWh	quilowatt-hora
$m^3$	metro cúbico
MJ	Megajoules
Mt	Mega tonelada
MW	Megawatt
t	tonelada
TJ	Terajoules

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	15
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	15
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
<b>2.1 Resíduos Sólidos Urbanos</b> .....	17
<b>2.1.1 Geração e gravimetria dos resíduos sólidos urbanos</b> .....	18
<b>2.1.2 Destinação final</b> .....	21
<b>2.2 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS</b> .....	22
<b>2.2.1 Energia e Mudanças climáticas</b> .....	22
<b>2.2.2 Waste to energy</b> .....	23
<b>2.2.2.1 Incineração</b> .....	24
<b>2.2.2.2 Pirólise</b> .....	25
<b>2.2.2.3 Gaseificação</b> .....	26
<b>2.2.2.4 Digestão anaeróbia</b> .....	27
<b>2.2.2.5 Aterro com recuperação de gás</b> .....	27
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	28
<b>3.1 BASE DE DADOS E STRING</b> .....	28
<b>3.2 EXPORTAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE NO EXCEL</b> .....	29
<b>3.3 VOSviewer</b> .....	30
<b>3.4 PERIÓDICOS E AUTORES</b> .....	30
<b>3.5 REVISÃO SISTEMÁTICA</b> .....	30
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	31
<b>4.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA</b> .....	31
<b>4.1.1 Palavras-chave e clusters</b> .....	31
<b>4.1.2 Periódicos</b> .....	34
<b>4.1.3 Rede de coautoria, autores e países</b> .....	36
<b>4.2 REVISÃO SISTEMÁTICA</b> .....	39
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	49
<b>5.1 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	49
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	51

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), entende-se por resíduos sólidos urbanos (RSU) aqueles provenientes de atividades domésticas de áreas urbanas e da limpeza e varrição de espaços públicos (BRASIL, 2010). O crescimento econômico e populacional no mundo tem contribuído significativamente para o aumento na geração de RSU e, segundo relatório da United Nations Environment Programme, (2024), a geração global no ano de 2020 foi de 2,126 bilhões de toneladas, sendo os lixões e aterros controlados o destino de 38%. Em decorrência do alto volume, a gestão inadequada dessa grande quantidade de resíduos sólidos afeta o meio ambiente, refletindo em poluição do solo, água e ar. Sharma & Jain (2020) destacam que essa realidade está sobretudo presente nos países de baixa e média renda, onde grande parte do RSU é descartado a céu aberto.

A PNRS destaca que a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos se dá pela não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento, e disposição final, promovendo uma dinâmica mais cíclica e que considera a disposição dos rejeitos como último recurso (Brasil, 2010). AlQattan *et al.*, 2018 ressaltam que muitos países, especialmente os desenvolvidos, consideram essa hierarquia para promover uma melhor gestão e controle dos resíduos. Além disso, observam que a recuperação energética fomenta a economia circular regenerativa, que se caracteriza por almejar uma economia de circuito fechado onde o crescimento econômico é desvinculado da degradação ambiental (AlQattan *et al.*, 2018).

As tecnologias de obtenção de energia a partir de resíduos são agrupadas na literatura internacional através o termo *Waste to Energy* (WtE). Dentre os métodos mais utilizados destacam-se as conversões térmicas (incineração, pirólise e gaseificação) e processos biológicos (digestão anaeróbia/biometanização) (Tabasová *et al.*, 2012). Apesar de não serem livres de causarem impactos ambientais, são opções que reduzem os malefícios causados por lixões e aterros controlados, sendo uma opção ambientalmente mais adequada e que ainda gera valor devido à energia recuperada.

Diante do exposto, a recuperação energética dos RSU surge como uma alternativa estratégica para empresas, municípios e regiões. Torna-se ainda mais importante frente ao potencial de mitigar os danos relacionados às mudanças climáticas, bem como por consistir de um meio de acelerar a transição energética, substituindo gradativamente os combustíveis fósseis e contribuindo, conseqüentemente, com a diminuição da emissão

de poluentes na atmosfera. Dados de 2023 da Agência Internacional de Energia (IEA, *acrônimo em inglês*), revelam que cerca de 81% da matriz energética global é constituída de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), ou seja, mostrando forte dependência desses tipos de fontes que agravam o problema das mudanças climáticas.

O presente trabalho analisa o estado da arte sobre a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, por meio de uma revisão sistemática da literatura. A análise bibliométrica ajuda a revelar principais autores, periódicos, termos mais utilizados, principais publicações, ou seja, mostra um quadro geral de como anda a produção científica de determinada área de conhecimento. Por isso, a revisão sistemática da recuperação energética dos RSU contribui para mostrar as tendências de estudos nesta área, podendo servir como um norte para futuras pesquisas.

Desta forma, neste trabalho utilizou-se a base de dados *Web of Science* para a pesquisa dos estudos publicados em formato de artigo e entre os anos de 2020 e 2025, sendo estes os critérios de filtragem. Também foram utilizados os *softwares VOSviewer*, especialmente voltado para análises bibliométricas a partir da criação de mapas de visualização, e o Excel para compilação e organização das informações referentes aos estudos que se enquadraram nos critérios definidos.

A presente pesquisa está alinhada ao compromisso global da Agenda 2030 na medida em que contribui com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, nomeadamente os de número 7 (Energia limpa e acessível), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), 12 (Consumo e produção responsáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Realizar uma revisão sistemática para identificação de estudos relevantes publicados, a partir da base de dados *Web of Science*, sobre a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Identificar os principais autores, palavras-chave, periódicos que contribuem para o tema analisado e suas relações.
- b) Identificar os principais eixos temáticos.

- c) Levantar as tecnologias WtE adotadas nos artigos mais relevantes do período considerado.

Neste primeiro capítulo foi apresentada a introdução do presente trabalho e os objetivos do mesmo. No capítulo dois, foi apresentada a fundamentação teórica, abordando sobre os RSU e tecnologias que os convertem em energia. No terceiro capítulo, foi explicado como se deu a metodologia e, no quarto foram apresentados os resultados. O quinto e último capítulo, foi destinado para as conclusões, limitações deste trabalho e recomendações.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A estrutura deste capítulo está dividida em dois tópicos principais. O primeiro trata da definição de resíduos sólidos e resíduos sólidos urbanos RSU. Em seguida são mostrados dados, tanto nacionais quanto globais, sobre a geração e gravimetria dos RSU e por fim alguns métodos de destinação final.

O segundo tópico se detém na apresentação geral da temática da recuperação energética de RSU, introduzindo o termo *Waste to Energy* (WtE) e nos sub-tópicos seguintes se detendo na descrição das principais tecnologias WtE utilizadas: incineração, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbia e aterro com recuperação de gás.

### 2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 e é um marco importante, visto que estabelece diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos. Assim, os resíduos sólidos são compreendidos como um bem econômico e de valor social, sendo um princípio norteador da lei. Esse entendimento contrasta com a percepção ainda enraizada na sociedade, que considera os resíduos sólidos como tudo aquilo que resta das mais variadas atividades humanas como algo inservível sem valor e sendo enquadrado como lixo (Freitas; Santana; Souza, 2023).

Os resíduos sólidos, pela PNRS, são definidos 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; (Brasil, 2010).

Entendimento semelhante é encontrado na classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1987, que foi atualizada em 2024 pela ABNT NBR 10004, que descreve as atividades das quais se originam os resíduos sólidos, a saber: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Já na PNRS, a classificação quanto à origem engloba os resíduos domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, da construção civil,

agrossilvipastoris, de serviços de transportes e de mineração.

Ainda de acordo com o documento da ABNT (2024), os resíduos sólidos são classificados quanto a sua periculosidade, possuindo a seguinte divisão: resíduos de classe I - Perigosos; e resíduos de classe II - Não Perigosos, sendo as sub-divisões resíduos classe II A - Não inertes e resíduos classe II B – Inertes, não mais presentes na nova versão.

Os resíduos classe I - Perigosos, são aqueles que se enquadram com risco à saúde pública ou ao meio ambiente seja por sua composição química, propriedades físicas ou potencial infecto-contagioso, enquanto os resíduos classe II – Não perigosos são os que, se descartados inadequadamente, podem impactar o meio ambiente de forma negativa. (ABNT NBR 10004, 2024).

Estas classificações são fundamentais para uma gestão ambientalmente correta e adequada, reduzindo as chances de contaminação do solo, água e ar, beneficiando, também, a saúde pública. Além disso, possibilita a eficiência da operacionalização e redução de custos no tratamento dos resíduos.

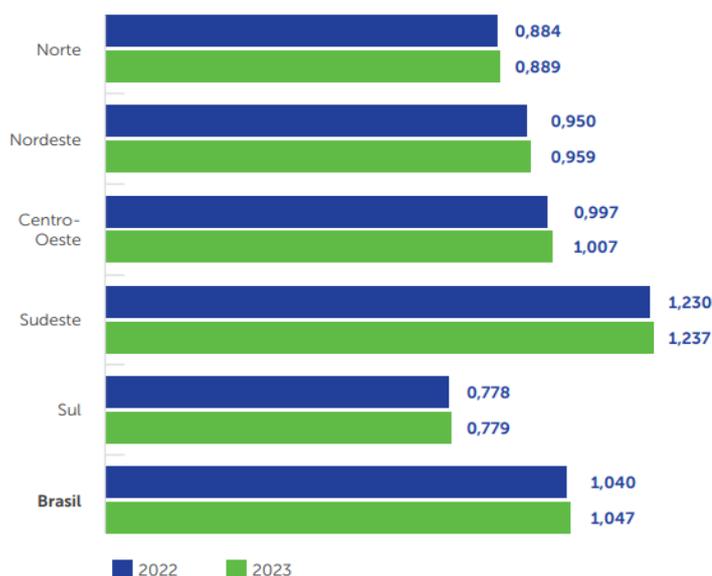
O que caracteriza os RSU são a sua origem, pois de acordo com a PNRS, os mesmos são oriundos de atividades domésticas em áreas urbanas e de varrição e limpeza de áreas públicas (Brasil, 2010).

### **2.1.1 Geração e gravimetria dos resíduos sólidos urbanos**

Um dos desafios globais que se apresenta e que vem se destacando, principalmente, nas últimas décadas é justamente o aumento da geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Alguns fatores que contribuem de forma determinante, para tal situação, são o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico. No ano de 2020, a estimativa global de geração de RSU foi de 2,126 bilhões de toneladas, e, devido a uma combinação de crescimento populacional e econômico, a projeção para o ano de 2050 é de 3,782 bilhões de toneladas caso nenhuma ação urgente seja tomada (United Nations Environment Programme, 2024).

No contexto nacional, segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), a geração de RSU em 2023 foi de quase 81 milhões de toneladas, resultando em um total de 382 kg por habitante neste ano ou 1,047 kg por dia (ABREMA, 2024). A Figura 1 mostra um comparativo entre os anos de 2022 e 2023 da geração *per capita* no Brasil.

Figura 1: Geração per capita, em quilo, no Brasil em 2022 e 2023

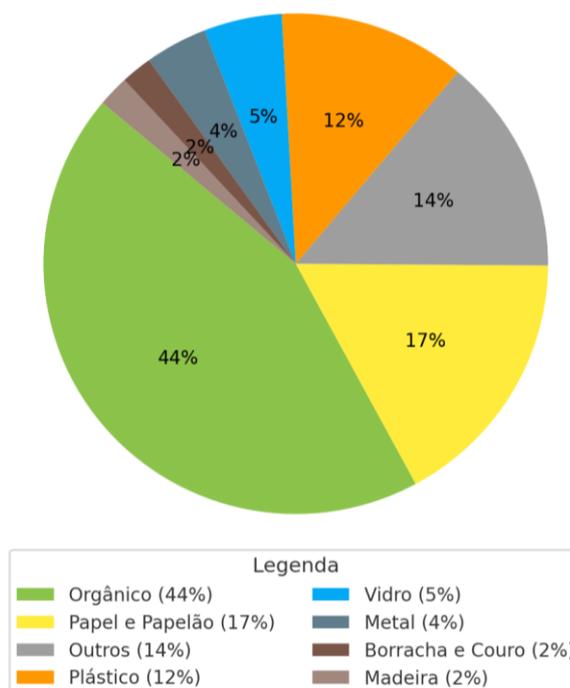


Fonte: ABREMA, 2024

Entre os objetivos da implantação da PNRS, engloba-se os princípios da racionalização da gestão dos resíduos, por meio da adoção de estratégias hierarquizadas, que reduzam a geração total, como a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final, sendo as primeiras ações fundamentais em combater o problema logo na origem. Essa hierarquia é importante para a gestão integrada, com a consequente diminuição dos rejeitos destinados para disposição final ambientalmente adequada, sendo esta entendida como a “distribuição ordenada de rejeitos em aterros” (Brasil, 2010).

A composição gravimétrica se refere à participação dos principais materiais presentes, em termos percentuais, em relação ao peso total da amostra de resíduos. O tipo de material encontrado e sua respectiva quantidade pode variar com a localidade e os hábitos de consumo da população, ou seja, a renda per capita, fatores intrínsecos de cada localidade (como os geográficos e climáticos) e desenvolvimento tecnológico são elementos que determinam as características dos resíduos sólidos (Bacelar, 2010). A respeito dos dados globais, a Figura 2, mostra a porcentagem e os tipos de materiais presentes nos RSU coletados no mundo.

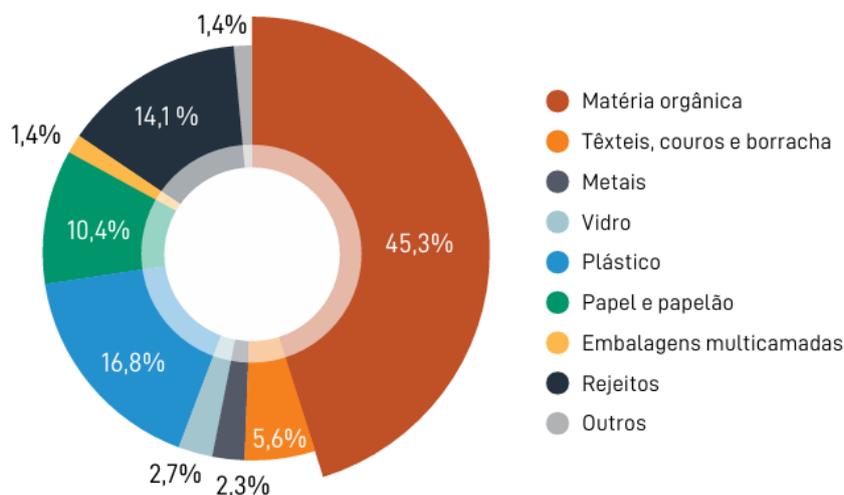
Figura 2: Composição gravimétrica global dos RSU



Fonte: Adaptado de Kaza *et al.*, (2018)

Percebe-se uma predominância dos resíduos orgânicos, cuja participação fica um pouco abaixo da metade. Similaridade pode ser vista no contexto brasileiro, como apresentado no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). A Figura 3 mostra a composição gravimétrica dos RSU no Brasil.

Figura 3: Composição gravimétrica brasileira dos RSU



Fonte: ABRELPE, 2020

O Panorama deixa claro que a porcentagem referente aos rejeitos se refere aos recicláveis contaminados que, com isso, ficaram impossibilitados de separação. Já as embalagens multicamadas são as que possuem mais de um tipo de material e os resíduos não considerados como RSU, mas que estavam no fluxo, foram contabilizados na categoria “outros”, como pneus, eletroeletrônicos e pilhas e baterias.

O conhecimento da composição gravimétrica dos RSU permite a separação das diferentes partes para dar-lhes a destinação mais adequada, como compostagem, reciclagem e recuperação energética possibilitando que apenas os rejeitos, em uma situação de gestão e gerenciamento eficientes, sejam dispostos nos aterros.

### **2.1.2 Destinação final**

A destinação final ambientalmente adequada abarca os materiais que ainda podem ser utilizados para um determinado fim, ou seja, um novo aproveitamento é dado aos resíduos. Esse aproveitamento, que pode incluir a reciclagem, compostagem, reutilização e a recuperação energética, deve ser escolhido de acordo com o tipo e as propriedades do material, melhorando os benefícios socioambientais (Martins, 2017).

A reciclagem consiste na reintrodução do resíduo no ciclo produtivo, quer seja no mesmo ou em outro, pelo processo de transformação das propriedades do material. Tal forma de destinação possui inúmeras vantagens, como a diminuição do volume disposto em aterros, diminuição do consumo de matérias primas e recursos naturais e, além do ambiental, impacta positivamente no social, sendo uma opção de renda para pessoas em situação de vulnerabilidade (Martins, 2017). Os dados no Brasil, no ano de 2023, apontam que 6,7 milhões de toneladas de RSU foram para reciclagem, compreendendo 8,3% do total gerado neste ano, sendo que mais da metade (67,2%) de todo o material enviado para a reciclagem foi coletado por catadores independentes (ABREMA, 2024).

O Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM) define a compostagem como “[...] o processo natural de decomposição biológica de materiais orgânicos (aqueles que possuem carbono em sua estrutura), de origem animal e vegetal, pela ação de microrganismos.” (IBAM, 2001, p. 124). Tal ação acaba resultando no uso do material decomposto em adubo, sendo este rico em húmus e nutrientes. Algumas vantagens desta forma de destinação, é a prevenção do solo contra erosões pelo adubo gerado, controle do pH, aumento da umidade e de nutrientes essenciais (Maranho, 2008). Estes benefícios só são conseguidos mediante um bom controle das condições necessárias para a decomposição, tais como relação carbono/nitrogênio (C/N), aeração (com

revolvimento periódico do material), umidade e temperatura (EMBRAPA, 2004).

Entende-se por reutilização o “processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química” (Brasil, 2010). Ela constitui um dos princípios da PNRS, sendo um dos elementos da ordem de prioridade da gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos (não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada). A reutilização requer uma mudança de percepção de como determinado material usado pode novamente ser útil, e não simplesmente um mero rejeito a ser descartado (Martins, 2017). Portanto, exemplos de reuso são: uso de pneus em jardins e pátios de brincar; doação de livros e revistas para escolas e bibliotecas; doação de roupas para caridade, reutilização de embalagens de madeira e plástico, etc., sendo estas ações muito ligadas aos 3 R's da sustentabilidade (reduzir, reutilizar e reciclar) (Abdul-Rahman, 2014).

## **2.2 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

### **2.2.1 Energia e Mudanças climáticas**

Além de toda a problemática dos resíduos sólidos, considerando o grande volume gerado, destinação, disposição, reuso, etc., um outro problema ambiental que também possui alcance global são as mudanças climáticas. A emergência climática vem sendo cada vez mais relacionada com ações antrópicas, que estariam, segundo diversos estudos (Ayoub *et al.*, 2024; Cook *et al.*, 2013; Eyring *et al.*, 2021), sendo determinantes na regulação do clima.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, *acrônimo em inglês*) afirma que as ações antrópicas causaram um aumento de cerca de 0,8 a 1,2 °C na temperatura global se comparada com os registros pré-industriais e pode chegar até 1,5°C, entre 2030 e 2052, com o atual ritmo de emissões (IPCC, 2018). As emissões de gases de efeito estufa (GEE), originárias das mais diversas fontes, são as grandes responsáveis por esse aumento, sobretudo os elevados índices de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. Dentre essas fontes originárias, destacam-se o uso e queima de combustíveis fósseis para os mais diversos fins (EPA, 2002).

Dado que o uso em larga escala dos combustíveis fósseis e não-renováveis (como o carvão, gás natural e petróleo) agrava um problema que já é bem crítico, torna-se cada vez mais necessário a busca por uma transição energética para métodos menos poluentes. Segundo dados de 2023 da Agência Internacional de Energia (IEA, *acrônimo em inglês*),

o suprimento total de energia global, ou seja, toda a energia requerida para suprir os usuários finais, teve como fontes o petróleo (30,2%), carvão (27,8%), gás natural (22,7%), biocombustíveis/resíduos (8,8%) e solar/eólica, hidráulica e nuclear (10,5%), sendo os combustíveis fósseis os grandes responsáveis pelo suprimento global. Para o cenário brasileiro, em 2024, a matriz energética é diversificada, composta por fontes renováveis e não renováveis. Entre as fontes não renováveis, destacam-se o petróleo e derivados (34%), o carvão mineral (4,5%), o gás natural (9,6%), a nuclear (1,3%) e outras fontes não renováveis (0,6%). Já as renováveis englobam a biomassa da cana (16,7%), hidráulica (11,6%), a eólica (2,9%), a lenha e o carvão vegetal (8,5%), a solar (2,2%) e o biodiesel, outras biomassas, biogás e gás industrial de carvão vegetal (8,1%) (EPE, 2025). Percebe-se, portanto, que o cenário brasileiro está relativamente melhor que o mundial, visto que as fontes renováveis correspondem a uma fração maior.

Tendo as questões climáticas e a grande geração de RSU como grandes problemas e desafios a serem enfrentados, torna-se ainda mais necessário a busca e incentivo por medidas que mitiguem os impactos dessas questões, sobretudo relacionando-as, ou seja, convertendo os resíduos sólidos em energia.

### **2.2.2 Waste to energy**

*Waste to energy* (WtE) é um termo que se refere às tecnologias de obtenção de energia a partir de resíduos e por meio de diferentes processos. Países desenvolvidos possuem as tecnologias WtE muito mais presentes em relação aos outros e vêm percebendo o potencial e efetividade para uma melhor gestão de resíduos (Kumar; Samadder, 2017). Também destacam-se entre as vantagens da recuperação energética, a redução do material a ser disposto (pelas tecnologias térmicas), e as reduções de emissões de GEE podendo contribuir para a mitigação do aquecimento global a longo prazo (Wang *et al.*, 2015). No cenário global, uma porcentagem expressiva de RSU ainda possui como destino os lixões e aterros controlados, correspondendo a 38% no ano de 2020, cerca de 805 milhões de toneladas (United Nations Environment Programme, 2024). evidenciando um alto potencial de matéria-prima para conversão em energia e redução dos impactos ambientais.

Dentre as tecnologias WtE mais utilizadas, destacam-se as conversões térmicas (incineração, pirólise e gaseificação) e os processos biológicos (digestão anaeróbia/biometanização) (Tabasová *et al.*, 2012). Para uma melhor eficiência de resultados destas tecnologias, é preciso considerar as características dos resíduos a serem

utilizados, como a quantidade e características físicas e químicas para garantir a qualidade do resíduo no processo de transformação em energia (Singh *et al.*, 2011). Desse modo, é importante conhecer a composição gravimétrica e direcionar o material para otimizar o processo de conversão.

Apesar das suas vantagens, as tecnologias WtE não são livres de causarem impactos ambientais. Tabasová *et al.* (2012) explica que os métodos térmicos tiveram expressivos avanços nos últimos tempos em função das legislações ambientais mais rigorosas. O recrudescimento da legislação proporcionou o desenvolvimento na área e a busca por maior equilíbrio entre viabilidade econômica, eficiência técnica e conformidade ambiental (Tabasová *et al.* 2012).

A seguir são descritas sucintamente as principais tecnologias de energização de RSU, quais sejam, incineração, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbia e recuperação de gás de aterro.

### **2.2.2.1 Incineração**

A incineração é uma das tecnologias de tratamento térmico de resíduos e emprega a combustão completa em fornos com alta temperatura. O processo conta com a fase de queima, recuperação energética e controle da poluição do ar. Henriques (2004) explica que o método pode ser dividido em duas a fases, sendo a primeira a queima do material na câmara primária (a que recebe os resíduos) de tal forma que haja a formação de gases e pequenas partículas, e a segunda fase realizada em uma segunda câmara onde os gases e partículas advindos anteriormente são queimados em um ambiente com bastante presença de oxigênio.

Os gases que são gerados devem passar por um processo de depuração visando uma emissão menos poluída e que atenda aos critérios legais. Para isso, a técnica de incineração atingiu um desenvolvimento tecnológico superior aos modelos mais antigos, cujos impactos negativos eram maiores. Um dos grandes atrativos deste tratamento é a significativa redução do volume do resíduo, sendo de longe o melhor para este fim e economizando, conseqüentemente, espaço no aterro (Brunner; Rechberger, 2015). Esta tecnologia termal se caracteriza por ser a mais utilizada mundialmente na recuperação energética de RSU (Boloy *et al.*, 2021).

Apesar do processo ter evoluído e melhorado sob os aspectos econômicos e ambientais, ainda há questões a serem endereçadas, a exemplo das emissões de poluentes atmosféricos como o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) (Bosmans *et al.*, 2013). Outra questão são

as cinzas volantes, pois apesar da grande vantagem, para a saúde pública, da incineração em eliminar patógenos e bactérias presentes nos resíduos, o material particulado se mostra nocivo à saúde através do transporte de metais pesados como mercúrio, chumbo, além de dioxinas e furanos (AlQattan *et al.*, 2018). As dioxinas e furanos são substâncias classificadas como poluentes orgânicos persistentes, altamente tóxicas e danosas à saúde humana (Oliveira Neto; Souza; Petter, 2014). Contudo, o uso de tecnologias modernas de controle de poluição reduziu os riscos associados às emissões para níveis mais baixos (BREF, 2006 *apud* Bosmans *et al.*, 2013).

### 2.2.2.2 Pirólise

A pirólise é também um processo térmico e que ocorre em condições de ausência de oxigênio. Neste método as temperaturas giram em torno de 500 a 600 °C tendo como resultado o gás de síntese, cuja composição dependerá das características dos resíduos sólidos utilizados e a temperatura da pirólise, mas que se caracteriza pela presença de hidrogênio (H) e monóxido de carbono (CO) podendo ser utilizado em motores e turbinas a gás e células de combustível (AlQattan *et al.*, 2018); bio-óleo, que é uma mistura líquida que contém compostos como resinas, ácidos e hidrocarbonetos; e uma fração sólida que possui carbono, oriundo do material orgânico utilizado no processo, e cinzas dos inorgânicos (Baggio *et al.*, 2008).

Ouda *et al.* (2016) ressalta que em um típico reator de dois estágios a primeira câmara trabalha em uma temperatura menor, enquanto na segunda há um aumento para garantir a combustão completa do material. Os materiais obtidos podem ser usados em aplicações energéticas a partir da purificação e mistura com gasolina (Chen *et al.*, 2014).

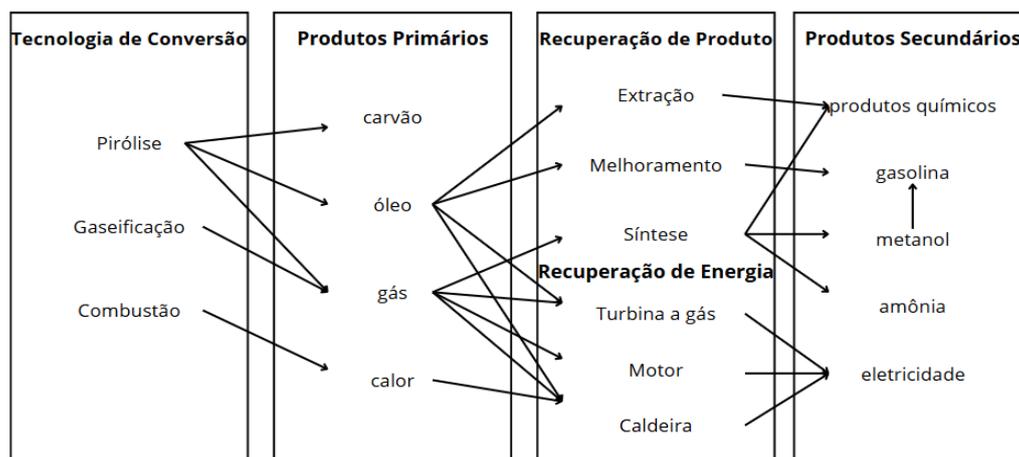
Assim como no processo de incineração, a pirólise também possui as vantagens da redução do volume e peso dos materiais. Destaca-se, também, a geração de composto sólido, líquido e gasoso como combustível. Pode-se encontrar estudos sobre a pirólise de tipos específicos de resíduos, como (Figueiredo, 2011) que investiga a pirólise da fibra de coco seco. Seu estudo destaca que existe uma contribuição na redução da poluição na natureza pelos resíduos, utilizando-os como insumos na pirólise e que há a possibilidade do bio-óleo proveniente da fibra de coco seco ser utilizado em conjunto em combustíveis líquidos. Já o estudo de Martínez *et al.*, (2013) ressalta que o produto líquido da pirólise do resíduo de pneus possui propriedades de conteúdo energético comparáveis com as do diesel, dependendo da composição do pneu e das condições de pirólise.

### 2.2.2.3 Gaseificação

A gaseificação é outro processo térmico no qual materiais ricos em carbonos, podendo ser líquidos ou sólidos, são convertidos em um produto gasoso combustível a partir do suprimento de um agente de gaseificação oxidante (Belgiorno *et al.*, 2003), podendo esse agente ser ar, oxigênio ou vapor d'água. Dá-se o nome desse processo de gaseificação direta, sendo a indireta (pirólise) feita sem um agente oxidante. O principal produto da gaseificação é o gás de síntese, que pode servir para matéria-prima química e combustíveis líquidos (Yap; Nixon, 2015).

A qualidade do gás dependerá do agente oxidante utilizado no processo. Quando é feito com ar, o produto possui baixa qualidade, apresentando entre 4 -7 MJ m<sup>-3</sup> de PCS (poder calorífico superior), sendo aplicável para operação de caldeira, motor e turbina. Quando se utiliza o oxigênio, o gás gerado possui um PCS na faixa entre 10 -18 MJ m<sup>-3</sup>, adequado para uso como gás de síntese na conversão para metanol e gasolina (Bridgwater, 1995). A Figura 4 mostra os processos de conversão térmica e seus produtos.

Figura 4: Processos de conversão térmica e seus produtos



Adaptado de Bridgwater 1995 *apud* Belgiorno *et al.*, 2003

O esquema da Figura 4 mostra as possibilidades de obtenção de diferentes produtos a partir do uso das tecnologias térmicas. Assim, sistemas variados são utilizados para a recuperação e tratamento destes produtos (Belgiorno *et al.*, 2003), refletindo as várias aplicabilidades e ganhos energéticos.

#### **2.2.2.4 Digestão anaeróbia**

A digestão anaeróbia é a decomposição da matéria orgânica por microrganismos em um ambiente sem oxigênio. O produto gasoso desse processo é chamado de biogás, sendo composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Existem alguns motivos que fazem a digestão anaeróbia ser bastante empregada, como por exemplo o longo tempo de conhecimento do processo e a consequente consolidação da técnica; aplicabilidade estendida tanto para resíduos orgânicos úmidos homogêneos quanto heterogêneos (Faaij 2006).

A digestão anaeróbia é realizada em reatores de digestão ou biodigestores, que possuem a vantagem de possibilitar um controle maior do processo visando sua otimização. Para a recuperação energética, dentre os produtos gerados o que se busca é justamente o biogás, que possui uma grande composição de metano. Devido ao seu poder calorífico, pode ser utilizado em atividades como geração de energia elétrica, uso como combustível e sistemas de aquecimento. Assim, dá-se um fim importante a um gás que seria lançado na atmosfera pela má disposição dos resíduos.

#### **2.2.2.5 Aterro com recuperação de gás**

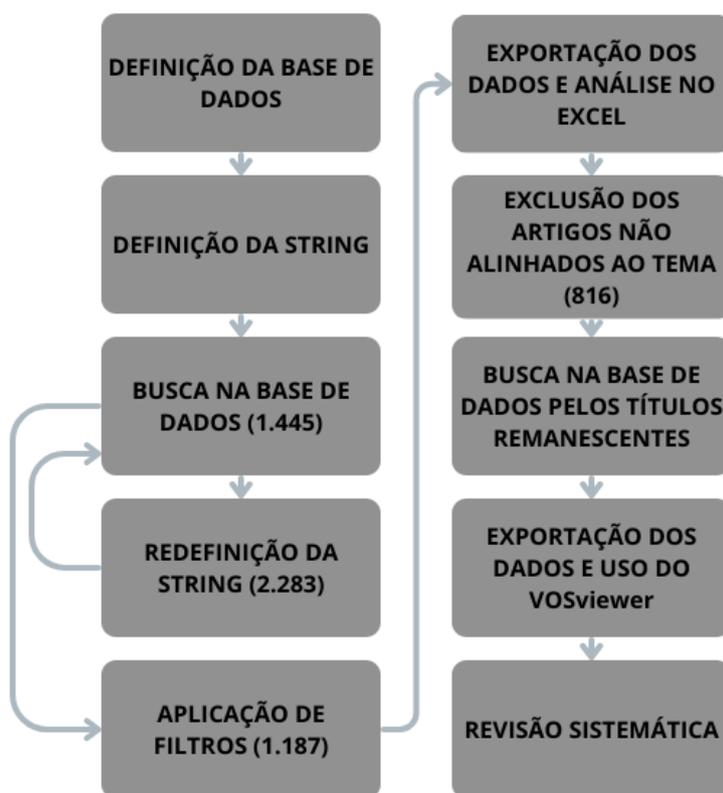
Nos aterros sanitários, devido à decomposição do material disposto, gera-se grandes quantidades de gases, sobretudo o metano que é um agravador do efeito estufa quando lançado na atmosfera. Por isso torna-se fundamental a captação desse gás, também conhecido como gás de aterro, para o seu aproveitamento.

A eficiência da captação do gás gerado pode chegar até a 75%, contudo na grande maioria dos aterros este valor fica entre 40% e 60% (Barlaz *et al.*, 2004). O processo de geração conta com uma fase de atividade aeróbia e outra anaeróbia, sendo a aeróbia ocorrendo na fase inicial e de duração curta, pois com o aterramento dos resíduos há o favorecimento das bactérias anaeróbias (Martins, 2017). As desvantagens se dão na necessidade de altas quantidades de terra e na emissão de metano para a atmosfera.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliométrica voltada aos estudos que abordam a recuperação energética de RSU, sendo uma “técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção e disseminação do conhecimento científico” (Araújo, 2006 *apud* Periolo, 2025). Foi realizada a revisão sistemática dos dez artigos mais relevantes do período analisado, além dos três mais citados do ano de 2024 e os dois mais citados do ano de 2025. Tal critério foi escolhido para que a variável tempo não fosse determinante, visto que os estudos de 2020 e 2021 predominam entre os mais citados do banco de dados . A Figura 5 mostra o fluxograma contendo as etapas da metodologia.

Figura 5: Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 3.1 BASE DE DADOS E STRING

A base de dados escolhida foi a *Web of Science* (WoS), que é mantida pela *Clarivate Analytics*. A escolha se deu por ela ser considerada uma das principais fontes com cobertura interdisciplinar, permitindo o estudo de diferentes campos científicos

(Archambault *et al.*, 2006). Os acessos ao site da WoS foram realizados mediante o navegador *Firefox* UFPB. A busca foi orientada por palavras relacionadas ao campo de pesquisa que se desejou estudar, junto com os operadores booleanos (“AND” e “OR”) formando, assim, a *string* de busca. Quando termos são pesquisados usando o operador “AND” (e), então todas as condições devem ser atendidas (operador de restrição). Já se for utilizado “OR” (ou), pelo menos uma das condições deve ser atendida (operador de ampliação).

A primeira *string* foi formada tendo como base o que foi utilizado em estudos parecidos. Nessa primeira busca foram identificados 1.445 documentos, contudo, optou-se por reformulá-la ao perceber novos termos, nos títulos dos trabalhos retornados pela WoS, que são essenciais ao campo de estudo da recuperação energética de RSU. Dessa forma, a *string* definitiva foi: “*municipal solid waste*” AND (“*energy production*” OR “*energy recovery*” OR “*energy generation*” OR “*power generation*” OR “*power recovery*” OR “*power production*” OR “*bioenergy generation*” OR “*bioenergy production*”). O recorte temporal, delimitando publicações entre os anos de 2020 e 2025, foi estipulado com o objetivo de assegurar que a análise esteja ancorada no estado da arte mais recente. Esta seleção visa captar as tendências, inovações tecnológicas e direcionamentos de pesquisa mais atuais no domínio do aproveitamento energético de resíduos. A busca na base Web of Science (WoS) foi conduzida em 24 de julho de 2025, utilizando-se os filtros para o tipo de documento "artigo" e campos de busca no título, resumo ou palavras-chave. Ao final deste processo, resultaram 1.187 documentos na base de dados.

### **3.2 EXPORTAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE NO EXCEL**

Com os filtros aplicados, foi baixado em arquivo “.txt” as principais informações sobre todos os artigos retornados pela WoS, que foram 1.187. Entre elas se destacam: título do artigo, resumo, autores, ano de publicação, periódico de publicação, número de citações e palavras-chave. A partir do *software* Excel, o arquivo foi importado e organizado em planilha.

Pela leitura do título e resumo, foram excluídos os artigos que não estavam alinhados ao tema, totalizando 371. Fez-se, então, uma nova pesquisa na base de dados a partir dos títulos dos documentos remanescentes para que se pudesse exportar um novo arquivo “.txt” e usá-lo no *software* VOSviewer. Os títulos que permaneceram, 816, formam o banco de dados de análise bibliométrica deste trabalho.

### 3.3 VOSviewer

O *VOSviewer* é um software gratuito desenvolvido por Nees Jan van Eck e Ludo Waltman (Universidade de Leiden - Países Baixos), especialmente voltado para a construção e visualização de mapas bibliométricos (Van Eck; Waltman, 2010). Por ele foram realizados mapas de rede de coocorrência de palavras-chave, rede de citações dos periódicos e rede de coautoria. Sobre a criação da rede de coocorrência de palavras-chave, notou-se que algumas eram escritas pelos autores de formas diferentes, por exemplo “*municipal solid waste*” e “*msw*”, ou “*waste to energy*” e “*waste-to-energy*”. Desta forma, o *VOSviewer* entendia como palavras diferentes, não refletindo a frequência correta dos termos. Por essa razão, foi necessário fazer a padronização da escrita em arquivo “.txt”, que é disponibilizado pelo próprio programa para a realização dessas correções e posterior inserção no *software*.

### 3.4 PERIÓDICOS E AUTORES

Para a compilação das tabelas dos periódicos e autores, as informações relativas às quantidades de artigos e número de citações foram obtidas através do próprio *VOSviewer*. Com relação ao índice do Qualis CAPES, índice nacional que mede a qualidade dos periódicos, foi obtido no site da Plataforma Sucupira - Qualis CAPES. A partir do site da WoS foram obtidas informações sobre o *Journal Impact Factor* (JIF), junto com o país da instituição dos autores e o Índice H, que reflete a produtividade do autor através do número de publicações e de citações (Clarivate, 2022).

### 3.5 REVISÃO SISTEMÁTICA

A seleção dos artigos para se fazer a análise se deu a partir do número de citações, sendo escolhidos quinze. A partir do *software* Excel foi possível classificar todos os títulos do banco de dados pelo número de citações. Desta forma, os dez primeiros foram escolhidos, juntos com mais três do ano de 2024 e dois de 2025.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

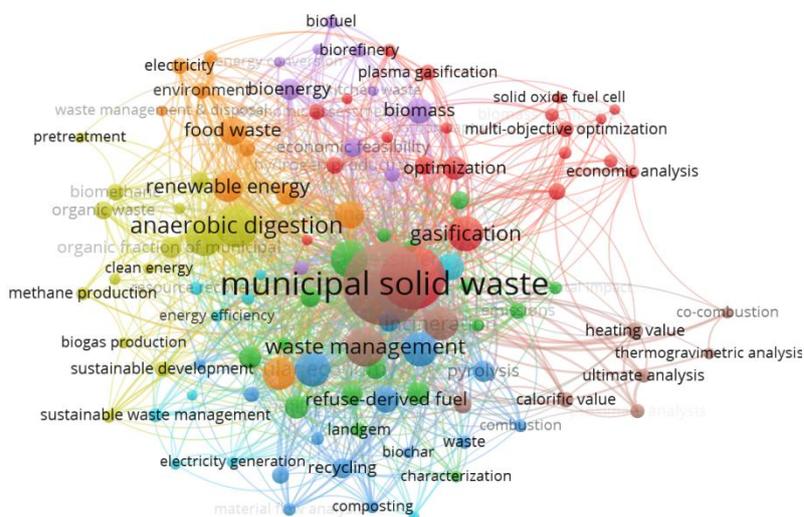
Este capítulo está dividido em duas partes, sendo a primeira voltada para a revisão bibliométrica da base de dados coletada. O mapeamento e análise dos dados foi realizado com o suporte do *software VOSviewer* versão 1.6.20. Para esta análise foram considerados: palavras-chave, periódicos, coautoria e área geográfica. Na segunda parte da análise foi realizada uma revisão sistemática a partir dos artigos mais relevantes do período analisado para levantar as principais tecnologias e eixos temáticos de recuperação energética de RSU.

### 4.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

#### 4.1.1 Palavras-chave e clusters

A análise do mapa das palavras-chave baseada nos dados de coocorrência permite a visualização de tendências e termos mais utilizados em um determinado campo de pesquisa (Seguí-Amortegui *et al.*, 2019). A Figura 6 mostra essa rede de palavras-chave, cadastradas pelos autores em seus trabalhos. As redes são organizadas em *clusters*, ou seja, em agrupamentos de termos que mais aparecem juntos nos trabalhos analisados. Já a Figura 7 mostra o ano médio no qual os termos mais aparecem nas publicações. Em ambas as redes o fator de grandeza é o número de ocorrência.

Figura 6: Rede de coocorrência de palavras-chave baseada em *clusters*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025



portanto, que estes termos e assuntos são relevantes ao estudar formas de recuperação energética de RSU.

Com relação à média dos anos no qual cada termo foi mais publicado, mostrado na Figura 7, percebe-se uma predominância geral nos anos de 2022 e 2023. Sendo as tonalidades mais amarelas as médias anuais mais recentes, as palavras-chave “*digestate*” (digestato) e “*biomass gasification*” (gaseificação de biomassa) são as mais atuais, ambas com a média no ano de 2024. O termo “*biomass gasification*” aparece no *cluster 1* e se revela como uma área de pesquisa associado à gaseificação e modelos computacionais como mencionado posteriormente na seção 4.2, Tabela 4. Este *cluster* agrupou palavras voltadas para a gaseificação, enquanto o termo “*digestate*” aparece no *cluster 4*, grupo mais relacionado à digestão anaeróbia.

Tabela 1: Principais palavras-chave de cada cluster e seus números de ocorrência

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
<b>waste to energy</b> (174); gasification (54); optimization (23); syngas (14); artificial neural network (12); hydrogen production (12); biomass gasification (8); aspen plus (7); machine learning (7)	<b>life cycle assessment</b> (58); landfill gas (24); greenhouse gas (21); greenhouse gas emissions (21); methane (19); solid waste (18); climate change (16); municipal solid waste management (14); emissions (11)	<b>energy recovery</b> (52); circular economy (51); refuse-derived fuel (27); pyrolysis (20); plastic waste (17); recycling (17); solid waste management (12)	<b>anaerobic digestion</b> (77); biogas (60); organic fraction of municipal solid waste (19); organic waste (14); biomethane (12); sustainable development (10); methane production (8); digestate (6)
Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Cluster 8
<b>biomass</b> (27); bioenergy (20); economic feasibility (16); carbon footprint (10); solid recovered fuel (9); biofuel (8)	<b>energy generation</b> (30); sustainable waste management (9); resource recovery (8); techno-economic analysis (7)	<b>landfill</b> (45); renewable energy (39); sustainability (34); food waste (33); energy (21); hydrogen (12); electricity (11); environment (11)	<b>municipal solid waste</b> (292); waste management (66); incineration (49); energy potential (13); heating value (12);

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

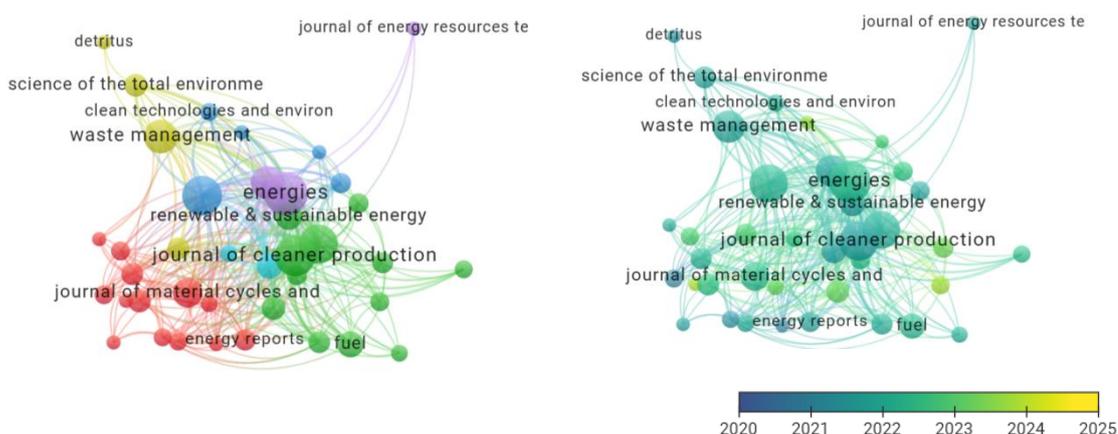
A Tabela 1 mostra os 8 *clusters* categorizados pelo software junto com as palavras-chave mais relevantes em termos de número de ocorrência. Percebe-se, pela categorização, linhas de pesquisa que se inserem dentro do eixo temático da recuperação energética de RSU. Visto que o termo *cluster* também é referido na literatura como *community* (comunidade) (Van Eck; Waltman, 2023), cada comunidade revela conexões

significativas dos termos em um eixo temático, como os que se relacionam na área dos tratamentos termais (*clusters* 1, 3 e 8), da digestão anaeróbia (*cluster* 4), de aterro (*clusters* 2 e 7)

#### 4.1.2 Periódicos

A análise da distribuição dos 816 artigos por periódicos revela uma considerável dispersão (217 veículos). Contudo, foram considerados para o estudo um núcleo de 40 periódicos com produção mais significativa, cada um publicando pelo menos cinco artigos relacionados ao tema. A Figura 8 mostra, pelo tamanho do nó, quais periódicos tiveram o maior número de publicações. Numa rede de citações, a linha entre dois nós representa a existência de citação entre eles; (Van Eck; Waltman, 2023) a distância entre os mesmos mostra essa frequência; já os *clusters* dos periódicos podem ser vinculados a áreas temáticas semelhantes (Van Eck; Waltman, 2010).

Figura 8: Rede de citações de periódicos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A rede de citação ficou dividida em 6 *clusters*. O periódico *Energies*, pertencente ao *cluster* 5 (roxo) foi o que teve o maior número de artigos, mas não o maior número de citações (Tabela 2). Em seguida aparecem o *Journal of Cleaner Production*, *cluster* 2 (verde), com 41 publicações e o *Sustainability*, *cluster* 3 (azul), com 39 publicações. Pela visualização do ano médio de publicação dos periódicos, nota-se, também, a ausência de cores extremas, com a concentração entre os anos do meio no período analisado.

Os dez periódicos, com o maior número de artigos, totalizaram 294 documentos, correspondendo, aproximadamente, 36% das produções, podendo ser considerados

essenciais para a área de recuperação energética de RSU. A Tabela 2 mostra as revistas mais proeminentes, não só pelo número de artigos publicados no campo dos RSU e recuperação energética, mas também pelo número de citações, a pontuação atribuída pelo Qualis CAPES e pelo fator de impacto internacional medido pelo *Journal Citation Report (Web of Science)*.

Tabela 2: Periódicos com mais publicações relacionadas à recuperação energética de resíduos sólidos urbanos

Revista/Periódico	Nº de artigos	Nº de citações	Qualis CAPES	JIF <sup>1</sup>
Energies	47	426	A2	3,2
Journal of Cleaner Production	41	1049	A1	10
Sustainability	39	488	A2	3,3
Energy	38	955	A1	9,4
Waste Management	28	588	A1	7,1
Energy Conversion and Management	27	733	A1	10,9
Journal of Material Cycles and Waste Management	22	136	A3	3
Renewable & Sustainable Energy Reviews	18	953	A1	16,3
Renewable Energy	17	601	A1	9,1
Fuel	17	702	A1	7,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

O número de citações está relacionado com a quantidade de citações que os artigos científicos de determinada revista possuem na base de dados da *Web of Science*. Desta forma, percebe-se que o *Journal of Cleaner Production*, apesar de ter um pouco menos de documentos que o *Energies*, teve muito mais citações. O *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *Renewable Energy* e *Fuel* se destacam por terem os menores números de publicações da referida tabela, mas referenciados, podendo indicar uma alta relevância dos estudos.

Conforme a Tabela 2, nota-se a presença de alguns destes periódicos no resultado encontrado por Chicaiza-Ortiz *et al.*, (2024), cuja pesquisa analisou as tecnologias *waste to energy* para a gestão de RSU; são eles: *Waste Management*, *Journal of Cleaner Production* e *Fuel*. Já no trabalho de Cui *et al.*, (2024) que realiza o estudo bibliométrico de tendências globais de tecnologias WtE em uma perspectiva neutra de carbono, cinco

<sup>1</sup> *Journal Impact Factor* (Fator de Impacto do Periódico)

periódicos coincidem: *Waste Management*, *Journal of Cleaner Production*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Energy Conversion and Management* e *Energy*.

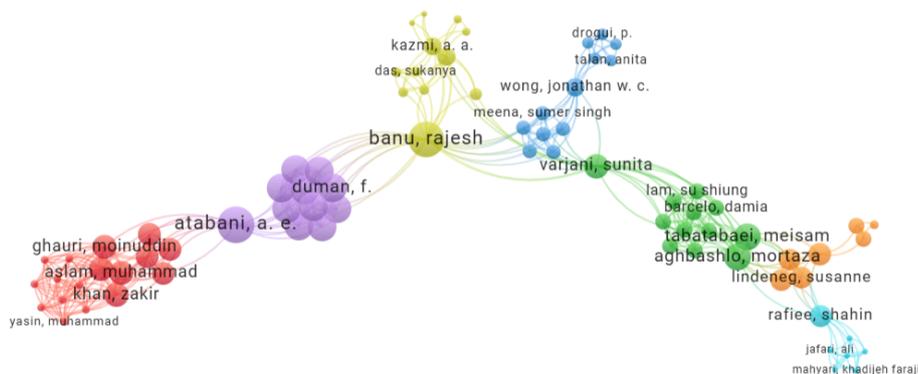
Com relação ao escopo dos periódicos, foi possível identificar três grupos interconectados. O primeiro marcado por uma predominância do tema energia como campo principal, sendo representado pelos periódicos: *Renewable Energy*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Energy Conversion and Management*, *Energy*, *Energies* e *Fuel*. O segundo grupo caracteriza-se por periódicos que abordam temáticas interdisciplinares na área das ciências ambientais e de produção. Este grupo é composto pelos periódicos *Journal of Cleaner Production* e *Sustainability*. O último grupo, engloba as revistas científicas mais voltadas à temática do tratamento de resíduos e é composto pelos periódicos *Waste Management* e o *Journal of Material Cycles and Waste Management*.

Por fim, considerando a classificação nacional da Qualis CAPES, que vai de A1 (mais alto) a C (mais baixo) (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, C), a amostra de revistas científicas é composta por sete periódicos com classificação A1, dois com classificação A2 e apenas um classificado como A3, o que reflete o prestígio acadêmico e notoriedade em suas respectivas áreas (Tabela 2).

#### 4.1.3 Rede de coautoria, autores e países

Uma rede de visualização de coautoria permite a identificação de padrões e *links* de colaboração entre os autores. Com relação ao banco de dados analisado (816 artigos), o mesmo possui a participação de 3.212 autores. A Figura 9 mostra a interação dos grupos mais importantes de coautoria entre os anos de 2020 e 2025, consistindo em 78 itens. O tamanho dos nós está relacionado com o número de citações de cada autor

Figura 9: Maior conjunto de itens conectados da rede de coautoria



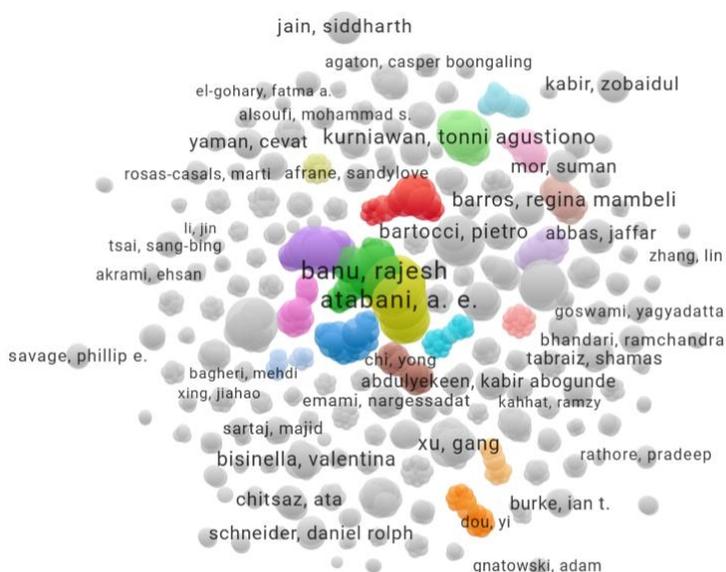
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Figura 9 mostra a maior capilaridade de coautoria. Destaca-se o nó de Rajesh Banu, da Universidade Anna, Índia, com conexões com os *clusters* amarelo, roxo, azul e verde, sendo o autor que possui o maior Índice H (59) e é o segundo em número de citações, com 410.

Nota-se que a relação entre o *cluster* vermelho com o roxo é feito por Abdulaziz Atabani, *Erciyas University*, Turquia. Tal autor é o que possui o maior nó da rede, com 435 citações, conforme descrito na Tabela 3. Apesar de possuir apenas dois documentos, Shahin Rafiee, Universidade de Teerã, Irã, (*cluster* azul claro) interliga o *cluster* azul claro com o laranja e o verde. Assim, Rafiee, Atabani, Banu e Sunita se caracterizam por sua rede de colaboração servindo como “pontes” entre os *clusters*.

Cabe destacar que se um grupo de autores possui apenas um documento no banco de dados, de sua própria autoria, forma-se, então, uma ilha de coautoria, não se relacionando com outros nós (autores) visto que não houve cooperação com outros. Desta forma, na Figura 10 pode-se observar a rede de coautoria levando em consideração todos os 3.212 autores, inclusive aqueles que não cooperaram com os demais autores da rede.

Figura 10: Rede de coautoria de todo o banco de dados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Figura 10 mostra as diversas redes que existem quando contabilizados todos os artigos do banco de dados. Os nós dessas redes relacionam-se apenas entre si, por isso a aparência de diversas “ilhas”. A Figura 9 mostra a maior ilha, composta por 78 autores (nós). Isso significa que todas as outras redes possuem menos autores. Ao todo, o

software VOSviewer identificou 540 clusters.

A Tabela 3 mostra os quinze autores com mais citações junto com o número de artigos publicados no banco de dados, o Índice H, obtido na *Web of Science*, e o país da instituição cujos autores são afiliados.

Tabela 3: Autores mais citados

Autor	Número de citações	Artigos	Índice H	País da instituição afiliada
Abdulaziz Atabani	435	2	52	Turquia
J. Rajesh Banu	410	4	59	Índia
Dan Cudjoe	393	12	24	China
Temitope Ayodele	316	5	32	Nigéria
Olawale Popoola	270	4	25	África do Sul
M. Rasit Atelge	266	1	16	Turquia
Fatih Duman	266	1	23	Turquia
Cigdem Eskicioglu	266	1	35	Canadá
Mustafa Kaya	266	1	23	Turquia
David Krisa	266	1	5	Canadá
Gopalakrishnan Kumar	266	1	77	Noruega
Changsoo Lee	266	1	39	Coréia do Sul
Ranganathan Mohanasundaram	266	1	7	Índia
Sebahattin Ünalán	266	1	14	Turquia
Yalçın Şevki Yıldız	266	1	19	Turquia

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Abdulaziz Atabani é o que possui o maior número de citações, com 435, significando que seus dois artigos tiveram essa quantidade na base de dados *Web of Science*. Portanto, verifica-se que há relevância nesses trabalhos, como de fato se verifica por estarem entre os três documentos com mais citações (Tabela 4). Nota-se que a presença de Dan Cudjoe está condicionada ao número de documentos que o mesmo publicou, se sobressaindo quando comparado aos outros. Dan Cudjoe não aparece, junto com Temitopoe Ayodele e Olawale Popoola, no maior conjunto de itens conectados da rede de coautoria (Figura 9). Com relação aos países, destaca-se a presença da Turquia com seis aparições, representando 40%. Isso se deve ao fato de o artigo com o maior número de citações possuir seis autores turcos.

## 4.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

A Tabela 4 mostra os dez artigos com mais citações geral, os três mais citados do ano de 2024 e os dois mais citados de 2025. O número leva em consideração também outras bases de dados; são elas: *BIOSIS Citation Index*, *Chinese Science Citation Database* e *SciELO Citation Index* (Web of Science, 2024)

Tabela 4: Artigos mais relevantes, da base WoS, entre 2020 e 2025

Artigo	Autores	Citações	Ano	Revista (JIF)	Objetivo	Metodologia	Waste to energy analisado	Pontos chave
A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery	Atelge, M. R.; Atabani, A. E.; Banu, J. R.; Krisa, D.; Kaya, M.; Eskicioglu, C.; Kumar, G.; Lee, C.; Yildiz, Y. S.; Ünal, S.; Mohanasundaram, R.; Duman, F.	281	2020	Fuel (7,5)	Rever as últimas tendências, progressos e conquistas de pesquisa sobre tecnologias de pré-tratamento para melhorar a eficiência da digestão anaeróbia de diferentes fontes de resíduos	Revisão crítica da literatura	Digestão anaeróbia	Os pré-tratamentos (físicos, químicos, biológicos e combinados) aumentam a produção de metano, reduzir o tempo de retenção hidráulica e melhorar a biodegradabilidade dos substratos complexos. Embora métodos individuais tenham desvantagens, como alto consumo de energia ou formação de inibidores, pré-tratamentos combinados oferecem efeitos sinérgicos para otimizar o processo.
Bioenergy in China: Evaluation of domestic biomass resources and the associated greenhouse gas mitigation potentials	Kang, Y.; Yang, Q.; Bartocci, P.; Wei, H.; Liu, S.; Wu, Z.; Zhou, H.; Yang, H.; Fantozzi, F.; Chen, H.	186	2020	Renewable & Sustainable Energy Reviews (16,3)	O artigo avalia o potencial energético da biomassa doméstica na China e sua capacidade de mitigar emissões de GEE, com foco em bioenergia e tecnologias de captura de carbono.	Análise estatística, avaliação espaço-temporal, cenários futuros e análise do ciclo de vida (ACV) para estimar o potencial energético da biomassa chinesa e sua mitigação de GEE.	Incineração, aterro com recuperação de gás	O potencial energético da biomassa na China entre 2000 e 2016 aumentou de 18,31 para $22,67 \times 10^{18}$ J. A mitigação de gases de efeito estufa pode alcançar até 5859,56 Mt CO <sub>2</sub> de forma acumulada no período de 2020 a 2050
Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects	Hameed, Z.; Aslam, M.; Khan, Z.; Maqsood, K.; Atabani, A. E.; Ghauri, M.; Khurram, M. S.; Rehan, M.; Nizami, Abdul-Sattar	171	2021	Renewable & Sustainable Energy Reviews (16,3)	Este artigo revisa criticamente a utilização de RSU e biomassa para recuperação de energia e recursos via gaseificação. Avalia tecnologias híbridas, desenvolvimentos futuros e impactos socioeconômicos/ambientais.	Revisão crítica da literatura	Gaseificação	A gaseificação de RSU e biomassa é eficaz para recuperação de energia e recursos. Tecnologias híbridas (digestão anaeróbia, célula fotovoltaica etc.) aumentam a eficiência, reduzem emissões tóxicas e melhoram a qualidade do gás produzido. Avaliações técnico-econômicas e ambientais indicam viabilidade comercial e benefícios sustentáveis para gestão de resíduos.

Continuação

Artigo	Autores	Citações	Ano	Revista (JIF)	Objetivo	Metodologia	Waste to energy analisado	Pontos chave
Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario	Sharma, Kapil Dev; Jain, Siddharth	160	2020	Social Responsibility Journal (4,1)	Apresentar o estado global atual da geração, composição e gerenciamento de RSU e os problemas relacionados, visando melhorar o gerenciamento global.	Agrupar 59 países desenvolvidos e em desenvolvimento por renda nacional, discutir 19 critérios para seleção tecnológica e analisar riscos, desafios e comparação global das tecnologias de gestão de RSU.	Incineração, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbia	Países desenvolvidos aplicam hierarquia de resíduos com foco em redução, reuso e reciclagem. Já países de baixa renda enfrentam sérios problemas, com altos índices de disposição inadequada. A segregação sistemática de resíduos é um componente crítico de um sistema de gestão de RSU bem-sucedido. Para fornecer resíduos de qualidade às usinas de WtE, os resíduos orgânicos com alto teor de umidade devem ser separados dos resíduos secos com alto valor calorífico.
Environmental life cycle assessment of different biorefinery platforms valorizing municipal solid waste to bioenergy, microbial protein, lactic and succinic acid	Khoshnevisan, B.; Tabatabaei, M.; Tsapekos, P.; Rafiee, S.; Aghbashlo, M.; Lindeneg, S.; Angelidaki, I.	154	2020	Renewable & Sustainable Energy Reviews (16,3)	Analisar, via ACV, diferentes rotas de biorrefinaria para converter RSU em bioenergia e bioprodutos, promovendo soluções sustentáveis, ecoeficientes e alinhadas à bioeconomia circular.	ACV consequencial para comparar seis cenários de valorização da fração orgânica de RSU, integrando experimentos laboratoriais	Digestão anaeróbia	Todos os cenários de biorrefinaria apresentaram benefícios ambientais. A produção de biometano foi a mais vantajosa nas categorias Mudança Climática, Saúde Humana e Recursos. A integração da proteína microbiana com biometano e a produção de ácido lático também se mostraram rotas altamente eficientes e sustentáveis para a valorização de resíduos urbanos.
Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment	Khan, Imran; Kabir, Zobaidul	136	2020	Renewable Energy (9,1)	Avaliar a sustentabilidade de tecnologias WtE, focando em países em desenvolvimento, com destaque para Bangladesh	Análise multicritério com 34 indicadores de sustentabilidade (econômicos, ambientais e sociais) para comparar e ranquear quatro tecnologias WtE.	Incineração, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbia	A digestão anaeróbia foi a tecnologia mais sustentável (111% superior à incineração), seguida pela pirólise (65%) e gaseificação (33%). A incineração foi a menos sustentável. A digestão anaeróbia mostrou-se a opção mais viável para países em desenvolvimento, como Bangladesh, devido à composição dos resíduos.

Artigo	Autores	Citações	Ano	Revista (JIF)	Objetivo	Metodologia	Waste to energy analisado	Pontos chave
Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria	Alao, M. A.; Ayodele, T. R.; Ogunjuyigbe, A. S. O.; Popoola, O. M.	131	2020	Energy (9,4)	Identificar a melhor tecnologia WtE para Lagos, Nigéria.	Aplicação do método multicritério TOPSIS para selecionar a tecnologia WtE ideal em Lagos, Nigéria. Avaliou opções com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais	Incineração, pirólise, digestão anaeróbia, aterro com recuperação de gás	A digestão anaeróbia é a melhor tecnologia individual para geração de energia a partir de resíduos em Lagos, seguida pela pirólise. A incineração mostrou-se a pior opção devido aos altos custos e impactos ambientais. A combinação de digestão anaeróbia, recuperação de gás de aterro e pirólise oferece os melhores resultados ambientais e energéticos.
Assessing the energy dynamics of Pakistan: Prospects of biomass energy	Irfan, M.; Zhao, Zhen-Yu; Panjwani, M.K.; Mangi, F.H.; Li, H.; Jan, A.; Ahmad, M.; Rehman, A.	126	2020	Energy Reports (5,1)	Avaliar a situação atual e as projeções futuras da geração de eletricidade utilizando recursos energéticos de biomassa.	Revisão crítica da literatura	Termais e aterro com recuperação de gás	O Paquistão depende principalmente de combustíveis fósseis, enquanto a participação de energia renovável é de apenas 1,1%. O artigo revela o potencial para geração de eletricidade por RSU, sendo de 560 kWh/t por conversões termais e 2747 GWh anualmente a partir de 12 aterros com 28 mil toneladas de RSU diárias, podendo auxiliar o país a atingir a meta de 5% de energia renovável até 2030.
Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices	Mor, Suman; Ravindra, Khaiwal	117	2023	Process Safety and Environmental Protection (7,8)	Analisar os impactos ambientais dos aterros de resíduos sólidos urbanos em países de baixa e média renda, propondo práticas sustentáveis como tecnologias de recuperação energética e gestão integrada de resíduos.	Pesquisa qualitativa, selecionando mais de 2000 estudos via bases de dados aplicando critérios de inclusão/exclusão com foco em resíduos sólidos urbanos.	Aterro com recuperação de gás, incineração, pirólise	A gestão inadequada de resíduos em aterros de países de baixa e média renda causa poluição ambiental e riscos à saúde, elevando as emissões de GEE. O estudo destaca tecnologias WtE como soluções sustentáveis, mas sua execução necessita de apoio financeiro e governamental, além de superar desafios de implementação em locais como a Índia.

Artigo	Autores	Citações	Ano	Revista (JIF)	Objetivo	Metodologia	Waste to energy analisado	Pontos chave
Status, characterization, and potential utilization of municipal solid waste as renewable energy source: Lahore case study in Pakistan	Azam, M.; Jahromy, S.S.; Raza, W.; Raza, N.; Lee, S.S.; Kim, Ki-Hyun; Winter, F.	116	2020	Environment International (9,7)	Avaliar a geração e composição do RSU em Lahore, Paquistão, investigando seu potencial como fonte renovável de energia.	Coleta de 12 amostras de RSU de áreas de renda baixa, média, alta e comercial realizando caracterização físico-química, análise de metais pesados e testes de lixiviação, para avaliar o potencial de energia.	Incineração	RSU de Lahore são majoritariamente biodegradáveis (56%) e possuem alto potencial energético, com valor calorífico médio de 14.490 kJ/kg. A incineração de 2.000 toneladas/dia pode gerar até 48 MW. A presença de metais pesados é controlada, com baixa lixiviação ambiental. A disposição final ainda é majoritariamente em aterros controlados e lixões.
Exergoeconomic and exergoenvironmental analyzes of a new biomass/ solar-driven multigeneration energy system: An effort to maximum utilization of the waste heat of gasification process	Ghasemi, A.; Rad, H.N.; Akrami, M.; Marefati, M.	42	2024	Thermal Science and Engineering Progress (5,4)	Propor um sistema híbrido biomassa/solar maximizando o uso do calor residual da gaseificação para produzir energia elétrica, hidrogênio e água	Simulação termodinâmica, modelagem matemática e análises exérgica, exergoeconômica e exergoambiental, para avaliar desempenho técnico, econômico e ambiental do sistema híbrido biomassa/solar	Gaseificação	O sistema multigeracional solar/biomassa proposto gerou, para uma alimentação do ciclo de 397 MW de RSU, 154,1 MW de eletricidade, 280 kg/dia de hidrogênio e 265,4 m³/h de água potável. Apresentou eficiências energética e exérgica de 38,8% e 32,2%, respectivamente. O custo nivelado de energia foi 3,82 USD/GJ. A produção simultânea de energia, gás hidrogênio e água doce pode aumentar a atratividade e a globalização de um sistema energético.
Quantification of landfill gas generation and energy recovery estimation from the municipal solid waste landfill sites of Delhi, India	Srivastava, A.N.; Chakma, S.	39	2024	Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects (2,2)	Estimar a emissão de gás metano em aterros sanitários de Delhi, avaliar incertezas nos modelos e quantificar o potencial energético do biogás gerado.	Modelos (IPCC Default, FOD e LandGEM) para estimar emissões, analisando incertezas e potencial energético via método Yedla.	Aterro com recuperação de gás	O IPCC Default superestimou os valores; o FOD apresentou menor incerteza. LandGEM teve resultados intermediários. O potencial energético do biogás foi calculado em 5783,62 TJ, destacando viabilidade de recuperação energética com sistemas eficientes.

Artigo	Autores	Citações	Ano	Revista (JIF)	Objetivo	Metodologia	Waste to energy analisado	Pontos chave
A comparative analysis of pre-treatment technologies for enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic waste	Karhikeyan, P.K.; Bandulasena, H.C.H.; Radu, T.	33	2024	Industrial Crops and Products (6,2)	Analisar tecnologias de pré-tratamento para melhorar a produção de biogás via digestão anaeróbica de resíduos lignocelulósicos, avaliando viabilidade técnica, econômica e sustentabilidade.	Revisão sistemática comparativa de tecnologias de pré-tratamento, avaliando desempenho, viabilidade técnica, econômica e sustentabilidade ambiental.	Digestão anaeróbia	Tecnologias de pré-tratamento podem aumentar a produção de biogás em até 360% a partir de resíduos lignocelulósicos. Métodos térmicos e combinados mostram alta eficácia industrial, enquanto os biológicos são sustentáveis, mas demorados. A escolha depende do tipo de resíduo, viabilidade econômica, escalabilidade e sustentabilidade ambiental.
Comparative analysis of a biomass-fueled plant coupled with solid oxide fuel cell, cascaded organic Rankine cycle and liquid hydrogen production system: Machine learning approach using multi-objective grey wolf optimizer	Asadabadi, M.J.R.; Balali, A.; Moghimi, M.; Ahmadi, R.	15	2025	Fuel (7,5)	Propor um sistema integrado de biomassa para produzir eletricidade e hidrogênio líquido, composto por gaseificador, célula a combustível de óxido sólido, recuperação de calor residual e produção de hidrogênio líquido.	Modelagem termoquímica, análise 4E (energia, exergia, econômica e ambiental), simulações em MATLAB, otimização com algoritmo e redes neurais artificiais para melhorar desempenho e reduzir custos.	Gaseificação	O sistema híbrido proposto, movido a biomassa, alcançou alta eficiência exérgica (até 39,8%), produção de hidrogênio líquido (até 11,2 kg/h) e custo reduzido (até \$74,9/h). RSU e esterco de aves foram os combustíveis mais eficazes. A otimização com algoritmo e redes neurais melhorou desempenho e sustentabilidade.
Anaerobic digestion in global bio-energy production for sustainable bioeconomy: Potential and research challenges	Duan, Y.; Wang, Z.; Ganeshan, P.; Sar, T.; Xu, S.; Rajendran, K.; Sindhu, R.; Binod, P.; Pandey, A.; Zhang, Z.; Taherzadeh, M.J.; Awasthi, M.K.	10	2025	Renewable & Sustainable Energy Reviews (16,3)	Avaliar os benefícios da digestão anaeróbica na produção de bioenergia, destacando seu papel na bioeconomia sustentável, tratamento de resíduos, geração de bioprodutos e redução de impactos ambientais.	Revisão crítica da literatura	Digestão anaeróbia	A digestão anaeróbia reduz emissões de GEE, trata resíduos orgânicos e produz biogás e ácidos graxos voláteis para bioenergia e bioprodutos. O digestato é um biofertilizante eficaz, mas enfrenta desafios como emissões de amônia e metais pesados. Integrações com processos termoquímicos, pela gaseificação do digestato, potencializam a economia circular.

Conforme descrito na Tabela 4, os artigos foram classificados em quatro eixos temáticos: **digestão anaeróbia** (Atelge *et al.*, 2020; Duan *et al.*, 2025; Karthikeyan; Bandulasena; Radu, 2024; Khoshnevisan *et al.*, 2020); **gaseificação e tecnologias/sistemas híbridos** (Ghasemi *et al.*, 2024; Hameed *et al.*, 2021; Raji Asadabadi *et al.*, 2025); **estudos nacionais/regionais sobre RSU** (Alao *et al.*, 2020; Azam *et al.*, 2020; Irfan *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2020; Srivastava; Chakma, 2024); e **estudos globais** (Khan; Kabir, 2020; Mor; Ravindra, 2023; Sharma; Jain, 2020). A digestão anaeróbia foi o tema central de 4 trabalhos, tendo a questão do pré-tratamento da matéria orgânica como pontos centrais de Atelge *et al.*, (2020) e Karthikeyan; Bandulasena; Radu, (2024), sendo este último relacionando, também, com os aspectos econômicos, junto com Khoshnevisan *et al.*, (2020) e Duan *et al.*, (2025). Tecnologias híbridas a partir da gaseificação foi tema estudado em 3 artigos científicos. Assim, buscou-se a análise de sistemas diferentes atuando em conjunto para a busca do aumento de eficiência energética acompanhado de benefícios ambientais, o que se mostrou viável.

Outro eixo temático identificado foram estudos em escala nacional ou regional objetivando a estimação do potencial energético de RSU e biomassa (Azam *et al.*, 2020; Irfan *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2020), assim como dos aterros (Srivastava; Chakma, 2024) e identificação da melhor tecnologia WtE levando em consideração a realidade local (Alao *et al.*, 2020). As áreas de estudo desses trabalhos possuem em comum o fato de serem locais pertencentes ao sul global de países menos desenvolvidos ou em desenvolvimento, caracterizando-se pela predominância de disposição final de RSU de forma ambientalmente inadequada, ou seja, com muita potencialidade de pesquisa. Já no tema dos estudos globais, verifica-se a presença de países em desenvolvimento como objetos de análise nos 3 artigos deste eixo, bem como a implementação de tecnologias WtE como alternativas sustentáveis ao que vem sendo praticado nesses lugares.

Com relação aos periódicos nos quais os artigos foram publicados, o que mais se repetiu foi o *Renewable & Sustainable Energy Reviews* com 4 documentos (aproximadamente 26,7%), sendo o que possui também o maior JIF (16,3). O outro periódico que possui mais de um documento é o *Fuel*, com dois, sendo um deles o que possui o maior número de citações. Ambos os periódicos estão entre os dez com o maior número de publicações na base de dados analisada, (Tabela 2), juntos com o *Energy* e o *Renewable Energy*, que possuem um trabalho cada entre os quinze analisados.

No que diz respeito à metodologia empregada nos estudos, quatro realizaram uma revisão crítica da literatura, sendo dois sobre digestão anaeróbia, um sobre gaseificação

e o outro abrangendo a digestão anaeróbia, gaseificação, incineração e pirólise. Outro método utilizado foi a análise multicritério (*Multi-Criteria Decision Making – MCDM*) para seleção da melhor tecnologia WtE, sendo adotada em dois trabalhos. Um deles, a técnica TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to an Ideal Solution*), utilizada por Alao *et al.*, 2020, possibilita a classificação de alternativas relacionadas a uma questão que requer tomadas de decisões com múltiplos critérios (Alao *et al.*, 2020). Assim, os autores concluem, a partir de critérios técnicos (potencial de geração de eletricidade e grau de desenvolvimento e aplicação comercial da tecnologia), econômicos (custo de investimento, custo de operação e manutenção e custo da energia gerada) e ambiental (quantidade total de GEE emitidos durante a operação da planta), que a digestão anaeróbia é a melhor tecnologia WtE, quando aplicadas isoladamente, para a realidade da cidade de Lagos, Nigéria, seguida por pirólise, recuperação de gás de aterro e incineração. Esta última foi desencorajada devido a seus altos custos de investimento, operação e manutenção, além de ter sido analisada com o pior potencial de redução de emissões. Analisando operações de forma híbrida, a melhor opção foi digestão anaeróbia/aterro com recuperação de gás/pirólise, e a pior ranqueada aterro com recuperação de gás/incineração.

O método SMARTER (*Simple Multi Attribute Rating Technique Exploiting Ranks*), utilizado no estudo de Khan; Kabir, (2020), também é uma técnica multicritério que foi empregada para analisar a sustentabilidade de tecnologias WtE. Nela, os tomadores de decisão ordenam os critérios por relevância, e os pesos podem ser obtidos através do próprio método (Barfod; Leleur, 2014). Os resultados indicaram que, a partir dos critérios econômicos, ambientais e sociais, a melhor tecnologia WtE para países em desenvolvimento, como Bangladesh, é a digestão anaeróbia, sendo 111% (tendo a incineração como parâmetro) mais sustentável do que a incineração, que foi considerada a pior opção, assemelhando-se aos resultados de Alao *et al.*, 2020. O bom desempenho da digestão anaeróbia foi justificado por requerer menos extensão de terra, emitir menos poluentes, produzir menos poeira, menor risco para a saúde e maior aceitação por parte da comunidade, enquanto a incineração foi a opção menos viável devido à geração de poluentes e material particulado, altos custos de instalação e operação e menos aceitação por parte da comunidade.

Também foi identificado, nas metodologias, a utilização de avaliação de ciclo de vida - ACV - em dois trabalhos como ferramenta para apoiar a parte metodológica. Kang *et al.* (2020) utiliza a ACV visando as emissões de GEE ligadas à produção e uso de

bioenergia de diferentes fontes. Já Khoshnevisan *et al.* (2020) usa na quantificação e comparação dos impactos ambientais dos cenários desenvolvidos de biorrefinarias que valorizam a fração orgânica de RSU. Cui; Wei; Ji, (2024) apontam para a necessidade do uso integrado de ACV e MCDM para uma maior compreensão da gestão de RSU, constituindo uma nova ferramenta para trabalhos futuros.

O uso de modelagens foi empregado em três trabalhos, sendo dois com foco na gaseificação a partir do calor residual. Ghasemi *et al.*, (2024) utilizaram os softwares MATLAB e Aspen na simulação de sistema composto por unidades de geração de energia, unidade de gaseificação, unidade solar, unidade de eletrólise de água e unidade de dessalinização de água do mar. Já Raji Asadabadi *et al.* (2025) utilizaram MATLAB e REFPROP (*software* utilizado na área da termodinâmica para modelagem de ciclos termodinâmicos) junto com aprendizado de máquina e redes neurais artificiais para prever a eficiência operacional do sistema composto por gaseificador e célula a combustível de óxido sólido para a produção de energia e hidrogênio líquido. Ambos os artigos estudam a gaseificação de biomassa. Percebe-se, portanto, a existência de linhas de pesquisa abordando a gaseificação a partir de metodologias com programas computacionais mais convencionais como o AspenPlus, e mais modernas baseadas em redes neurais artificiais e aprendizado de máquina (Chicaiza-Ortiz *et al.*, 2024). Tal relação pode ser vista no cluster 1 (Tabela 1) com os nomes *gasification*, *aspen plus*, *artificial neural network* e *machine learning*.

Outro grupo metodológico presente consiste em revisões comparativas de tecnologias de pré-tratamento para aumento da produção de biogás via digestão anaeróbia (Karthikeyan; Bandulasena; Radu, 2024) e de gestão de RSU em países desenvolvidos e em desenvolvimento (Sharma; Jain, 2020), e pesquisa qualitativa para seleção de artigos relevantes sobre gestão de RSU (Mor; Ravindra, 2023). Estes dois últimos trabalhos mostram a dependência do aterro sanitário, de forma global, como principal forma de disposição dos resíduos. Por fim, Azam *et al.* (2020) realizaram caracterização físico-química do RSU de Lahore, Paquistão para investigação do potencial como fonte de energia pela incineração. Apesar dos RSU do local serem em grande quantidade constituídos por biodegradáveis, os autores não consideram a recuperação energética via aterros devido à dificuldade de aquisição de espaço suficiente para as instalações.

Alguns estudos se caracterizam pela análise de apenas uma tecnologia WtE, sendo a digestão anaeróbia a que mais se repetiu, com quatro aparições. Depois aparecem a gaseificação, com três, e aterro com recuperação energética e incineração com uma cada.

Ao observar todos os trabalhos, seja com uma ou mais tecnologias analisadas, a digestão anaeróbia também se destaca, com sete aparições, seguida pela incineração, com seis, aterro com recuperação de gás e gaseificação, com cinco cada, e pirólise com quatro. Esta última não apareceu em nenhum estudo de forma individual.

Isso reflete, de alguma forma, os números de ocorrência das principais palavras-chave (Tabela 1), visto que, dentre as opções de recuperação energética de RSU “*anaerobic digestion*” (digestão anaeróbia) foi a que mais se repetiu, evidenciando um grande interesse pelo tema. Depois aparecem “*gasification*” (gaseificação) e “*incineration*” (incineração), sugerindo serem as tecnologias termais mais estudadas.

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho objetivou o levantamento de referências que permitissem a compreensão sistemática do estado da arte sobre a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. A partir do emprego de análise bibliométrica com a adoção dos *softwares VOSviewer* e Excel, seguida de revisão sistemática da literatura foi possível o alcance dos objetivos traçados deste trabalho. Assim, possibilitou-se a organização, tratamento e visualização dos dados para a identificação de eixos temáticos, principais autores, periódicos, palavras-chave utilizadas e artigos relevantes, no período de 2020 a 2025, junto com as tecnologias WtE utilizadas nestes estudos.

Percebe-se que o estudo da recuperação energética de RSU está associado com a preocupação ambiental. Palavras-chave bastante recorrentes como “*life cycle assessment*” (avaliação do ciclo de vida), “*circular economy*” (economia circular) e “*waste management*” (gestão de resíduos) refletem a busca pela redução dos impactos ambientais, causados por métodos e destinações inapropriadas (como os lixões e aterros controlados), através do uso de tecnologias WtE. Isso reforça a relação desta área de estudo com a agenda global em busca da sustentabilidade e redução da dependência dos combustíveis fósseis.

Observou-se, na revisão sistemática, que o local de estudo, características socioeconômicas e da composição dos RSU, influenciam na escolha da melhor tecnologia de recuperação energética. Isso mostra que cada uma possui suas vantagens e desvantagens, sendo necessário a compreensão da área de instalação para potencializar os benefícios da tecnologia adotada. A análise multicritério adotada em dois artigos foi fundamental para se chegar na escolha ideal, mostrando ser uma ferramenta imprescindível para tomadas de decisão. Nota-se, também, a presença de diferentes eixos temáticos e metodologias, refletindo a possibilidade de múltiplas abordagens para o estudo da área.

### 5.1 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

As limitações deste trabalho estão relacionadas com a *string* utilizada, visto que palavras importantes e recorrentes da área podem não ter sido consideradas, a utilização de apenas uma base de dados e possíveis erros nas considerações de alinhamento ao tema a partir da leitura do título/resumo.

Como recomendações, sugere-se a realização de uma revisão bibliométrica e

sistemática utilizando mais de uma base de dados, como *Scopus* e *Scielo*, junto com algum programa de identificação de possíveis trabalhos duplicados, o que resultaria em uma maior variedade de estudos sobre o tema. Também fica como sugestão o aumento do espaço do tempo das publicações dos artigos, possibilitando a análise dos eixos temáticos mais estudados ao longo dos anos.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABDUL-RAHMAN, Fahzy. **Reduce, Reuse, Recycle: Alternatives for Waste Management**. Las Cruces New Mexico State University, jan. 2014.
- ALAO, M. A. *et al.* Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria. **Energy**, v. 201, p. 117675, jun. 2020.
- ALQATTAN, Nael *et al.* Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. **Renewable Energy Focus**, v. 27, p. 97–110, dez. 2018.
- ARCHAMBAULT, Éric *et al.* Benchmarking scientific output in the social sciences and humanities: The limits of existing databases. **Scientometrics**, v. 68, n. 3, p. 329–342, 20 set. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: [S.n.].
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2024 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. [S.l.: S.n.].
- ATELGE, M. R. *et al.* A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. **Fuel**, v. 270, p. 117494, jun. 2020.
- AYOUB, Julianno Pizzano *et al.* Ações Antrópicas E A Associação Com As Mudanças Climáticas. **IOSR Journal of Business and Management**, v. 26, n. 12, p. 21–27, dez. 2024.
- AZAM, Mudassar *et al.* Status, characterization, and potential utilization of municipal solid waste as renewable energy source: Lahore case study in Pakistan. **Environment International**, v. 134, p. 105291, jan. 2020.
- BACELAR, Harley Alves da Mata. **Tratamento de Lixiviados Produzidos em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Evaporação Forçada**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- BAGGIO, Paolo *et al.* Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 2–3, p. 136–144, fev. 2008.
- BARFOD, Michael Bruhn; LELEUR, Steen. **Multi-criteria decision analysis for use in transport decision making**. Série de Compêndios parte 2—[S.l.]: Technical University of Denmark, 2014.
- BARLAZ, M. A. *et al.* Evaluation of a Biologically Active Cover for Mitigation of Landfill Gas Emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 18, p. 4891–4899, 1 set. 2004.

BELGIORNO, V. *et al.* Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, v. 23, n. 1, p. 1–15, jan. 2003.

BOLOY, Ronney Arismel Mancebo *et al.* Waste-to-Energy Technologies Towards Circular Economy: a Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 7, p. 306, 12 jul. 2021.

BOSMANS, A. *et al.* The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 10–23, set. 2013.

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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 74, n. 5, p. 631–653, maio 1995.

BRUNNER, Paul H.; RECHBERGER, Helmut. Waste to energy – key element for sustainable waste management. **Waste Management**, v. 37, p. 3–12, mar. 2015.

CHEN, Dezhen *et al.* Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, v. 34, n. 12, p. 2466–2486, dez. 2014.

CHICAIZA-ORTIZ, Cristhian *et al.* Waste-to-Energy technologies for municipal solid waste management: Bibliometric review, life cycle assessment, and energy potential case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 480, nov. 2024.

CLARIVATE. **Web of Science: h-index information**. 9 jun. 2022. Disponível em: <[https://support.clarivate.com/ScientificandAcademicResearch/s/article/Web-of-Science-h-index-information?language=en\\_US](https://support.clarivate.com/ScientificandAcademicResearch/s/article/Web-of-Science-h-index-information?language=en_US)> Acesso em: 11 set. 2025.

COOK, John *et al.* Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, p. 024024, 1 jun. 2013.

CUI, Wenjing; WEI, Yuan; JI, Ningning. Global trends of waste-to-energy (WtE) technologies in carbon neutral perspective: Bibliometric analysis. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 270, jan. 2024.

DUAN, Yumin *et al.* Anaerobic digestion in global bio-energy production for sustainable bioeconomy: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 208, p. 114985, fev. 2025.

EMBRAPA. **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos**. Fortaleza: [S.n.].

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: Relatório síntese 2025. Ano base 2024**. [S.l.: S.n.].

EPA. **Solid Waste Management and Green House Gases – A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks**, US.EPA. 2002

Eyring, V., N.P. Gillett, K.M. Achuta Rao, R. Barimalala, M. Barreiro Parrillo, N. Bellouin, C. Cassou, P.J. Durack, Y. Kosaka, S. McGregor, S. Min, O. Morgenstern, and Y. Sun, 2021:

**Human Influence on the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 423–552, doi: 10.1017/9781009157896.005.

FAAIJ, André P. C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, v. 34, n. 3, p. 322–342, fev. 2006.

FREITAS, Ketson Patrick de Medeiros; SANTANA, Genilson Pereira; SOUZA, Priscila Sayme Almeida. Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos nos sistemas isolados amazonenses. *Revista Valore*, v. 8, 5 maio 2023.

FIGUEIREDO, Aneliése Lunguinho. **Pirólise termoquímica de pós de fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. Dissertação—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, jul. 2011.

GEHM, Sandi da Costa. **Avaliação de alternativas para geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

GHASEMI, Amir *et al.* Exergoeconomic and exergoenvironmental analyzes of a new biomass/solar-driven multigeneration energy system: An effort to maximum utilization of the waste heat of gasification process. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 48, p. 102407, fev. 2024.

HAMEED, Zeeshan *et al.* Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 136, p. 110375, fev. 2021.

HENRIQUES, Rachel Martins. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: Uma abordagem tecnológica**. Tese—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, mar. 2004.

International Energy Agency. **Data and statistics, 2025**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: [S.n.].

IPCC. **Global Warming of 1.5°C**. Cambridge, UK. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2018.

IRFAN, Muhammad *et al.* Assessing the energy dynamics of Pakistan: Prospects of biomass energy. **Energy Reports**, v. 6, p. 80–93, nov. 2020.

KANG, Yating *et al.* Bioenergy in China: Evaluation of domestic biomass resources and the associated greenhouse gas mitigation potentials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 127, p. 109842, jul. 2020.

- KARTHIKEYAN, Pranesh Kannappan; BANDULASENA, Himiyage Chaminda Hemaka; RADU, Tanja. A comparative analysis of pre-treatment technologies for enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic waste. **Industrial Crops and Products**, v. 215, p. 118591, set. 2024.
- KAZA, Silpa *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. [S.l.]: Washington, DC: World Bank, 2018.
- KHAN, Imran; KABIR, Zobaidul. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. **Renewable Energy**, v. 150, p. 320–333, maio 2020.
- KHOSHNEVISAN, Benyamin *et al.* Environmental life cycle assessment of different biorefinery platforms valorizing municipal solid waste to bioenergy, microbial protein, lactic and succinic acid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109493, jan. 2020.
- KUMAR, Aman *et al.* Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity. **Energy**, v. 275, p. 127471, jul. 2023.
- KUMAR, Atul; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407–422, nov. 2017.
- MARANHO, Alexander da Silva. **Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos para Bauru e região**. Dissertação—Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2008.
- MARTÍNEZ, Juan Daniel *et al.* Waste tyre pyrolysis – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 179–213, jul. 2013.
- MARTINS, Benedito Luiz. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos: Análise documental e estudo comparativo entre aterro sanitário e incineração para geração de energia**. Tese de Doutorado—[S.l.]: Botucatu, 2017.
- MOR, Suman; RAVINDRA, Khaiwal. Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 174, p. 510–530, jun. 2023.
- OLIVEIRA NETO, Raul; SOUZA, Luis Eduardo De; PETTER, Carlos Otávio. AVALIAÇÃO DA GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, 16 nov. 2014.
- OUDA, O. K. M. *et al.* Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328–340, ago. 2016.
- PERIOLO, Andressa de Moura. **Estudo bibliométrico sobre gestão de resíduos sólidos urbanos no período de 2014 a 2023 em base de artigos nacional**. Trabalho de Conclusão de Curso—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 12 maio 2025.
- RAJI ASADABADI, Mohammad Javad *et al.* Comparative analysis of a biomass-fueled plant coupled with solid oxide fuel cell, cascaded organic Rankine cycle and liquid hydrogen

production system: Machine learning approach using multi-objective grey wolf optimizer. **Fuel**, v. 380, p. 133269, jan. 2025.

SEGUÍ-AMORTEGUI, Luis *et al.* Sustainability and Competitiveness in the Tourism Industry and Tourist Destinations: A Bibliometric Study. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6351, 12 nov. 2019.

SHARMA, Kapil Dev; JAIN, Siddharth. Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. **Social Responsibility Journal**, v. 16, n. 6, p. 917–948, 23 jun. 2020.

SINGH, R. P. *et al.* An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4797–4808, dez. 2011.

SRIVASTAVA, Abhishek N.; CHAKMA, Sumedha. Quantification of landfill gas generation and energy recovery estimation from the municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 46, n. 1, p. 7453–7466, 31 dez. 2024.

TABASOVÁ, Andrea *et al.* Waste-to-energy technologies: Impact on environment. **Energy**, v. 44, n. 1, p. 146–155, ago. 2012.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource**. [S.l.]: United Nations Environment Programme, 2024.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 31 ago. 2010.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. **VOSviewer Manual**. Manual VOSviewer—Leiden: Universiteit Leiden, 31 out. 2023.

WANG, Yuan *et al.* Effective approaches to reduce greenhouse gas emissions from waste to energy process: A China study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 103–108, nov. 2015.

WEB OF SCIENCE. **Citation Reports**. 2024. Disponível em: <[https://webofscience.zendesk.com/hc/en-us/articles/20016829622033-Citation-Reports#h\\_01HHCM0N82M8VR47TTYNQB112T](https://webofscience.zendesk.com/hc/en-us/articles/20016829622033-Citation-Reports#h_01HHCM0N82M8VR47TTYNQB112T)> Acesso em: 13 set. 2025

YAP, H. Y.; NIXON, J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, v. 46, p. 265–277, dez. 2015.