

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

Beatriz Cunha dos Santos



APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO BRASIL

RIO DE JANEIRO

2023

Beatriz Cunha dos Santos

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

C972a	<p>Cunha dos Santos, Beatriz Aproveitamento Energético do lixo no Brasil / Beatriz Cunha dos Santos. -- Rio de Janeiro, 2023. 48 f.</p> <p>Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.</p> <p>1. Aproveitamento Energético. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Waste-to-Energy. 4. Incineração. 5. Biogás. I. Campelo de Melo Ferraz, Clarice, orient. II. Título.</p>
-------	--

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Beatriz Cunha dos Santos

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 20 de dezembro de 2023.

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marcelo Mendes Viana, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ronaldo Goulart Bicalho, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2023

RESUMO

CUNHA DOS SANTOS, Beatriz. **Aproveitamento Energético do Lixo no Brasil**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Os resíduos sólidos urbanos podem ser utilizados como matéria-prima para a geração de energia renovável, seja em forma de eletricidade, calor ou combustível. Ao fazer um levantamento dessas diferentes rotas tecnológicas para seu aproveitamento energético, observou-se que as mais usuais são a digestão anaeróbia, que ocorre principalmente em aterros sanitários, e a combustão, através do processo de incineração. Com foco nessas tecnologias, analisou-se a difusão dessas tecnologias pelo mundo, analisando as experiências dos países que mais as utilizam. Existem diversas plantas voltadas para a digestão anaeróbia no Brasil, sendo responsáveis por produzir a maior parte do biogás utilizado para gerar energia elétrica, enquanto existem poucas plantas de incineração de resíduos sólidos urbanos para geração de energia e apenas em implantação ou com licença prévia. Ao comparar as tecnologias, conclui-se que, apesar da adoção de ambas serem viáveis no Brasil, a digestão anaeróbia se mostra como a abordagem mais adequada. Entre outras razões, encontra-se a disponibilidade de matéria-prima para produzir biogás e biofertilizantes no grande número de aterros sanitários existentes. Sendo assim, essa rota tecnológica está mais alinhada com as demandas ambientais, promovendo não apenas a geração de energia, mas também a redução de resíduos e a produção de insumos valiosos para a agricultura.

Palavras-chave: Aproveitamento Energético; Resíduos Sólidos Urbanos; *Waste-to-Energy*; Incineração; Biogás.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil por regiões (em kg/hab/dia)	11
Figura 2 – Foto de Lixão em Manaus.....	14
Figura 3 - Esquema de Aterro Sanitário	15
Figura 4 – Disposição Final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %)	16
Figura 5 – Coletores de Resíduos Sólidos	18
Figura 6 – Rotas de Conversão de Resíduos Sólidos em Energia.....	21
Figura 7 – Diagrama do Processo de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos	22
Figura 8 – Ciclo Rankine.....	23
Figura 9 – Reator Pirolítico	24
Figura 10 – Etapas da Digestão Anaeróbia	27
Figura 11 – Processo de Digestão Anaeróbia.....	28
Figura 12 – Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel	31
Figura 13 – Localização de usinas WtE que utilizam o processo de incineração	33
Figura 14 – Países com maior geração elétrica por biogás.....	35
Figura 15 – Número de Plantas e Volume de Biogás por Setor	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resíduos Sólidos: classificação, origem, composição, problemas e soluções.	12
Tabela 2 - Comparação entre Gaseificação e Incineração.....	26
Tabela 3 - Comparação entre Incineração e Digestão Anaeróbia de RSU.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	10
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	11
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	12
3.2 DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	14
3.2.1 Disposição Final	14
3.2.2 Coprocessamento	16
3.2.3 Landfarming	17
3.2.4 Coleta Seletiva e Reciclagem	17
4 WASTE-TO-ENERGY (WTE)	20
4.1 ROTAS TECNOLÓGICAS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS EM ENERGIA .	20
4.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA	21
4.2.1 Incineração	21
4.2.2 Pirólise	24
4.2.3 Gaseificação	25
4.3 PROCESSOS DE CONVERSÃO BIOQUÍMICA	26
4.3.1 Digestão Anaeróbia	26
4.3.2 Fermentação	29
4.4 PROCESSOS DE CONVERSÃO FÍSICO-QUÍMICA	30
5 METODOLOGIA	32
6 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO MUNDO	33
6.1 PLANTAS DE WTE QUE UTILIZAM INCINERAÇÃO	33
6.2 PLANTAS QUE UTILIZAM DIGESTÃO ANAERÓBICA	34
7 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO BRASIL	36
7.1 MARCO REGULATÓRIO DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS	36
7.2 USINAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	37
7.3 GERAÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL.....	38
8 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	41
9 REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A grande produção de resíduos sólidos e sua destinação estão diretamente relacionadas com a preservação do meio ambiente, dado que os resíduos são os responsáveis, de maneira direta ou indireta, pela contaminação e poluição do solo e dos corpos d'água e podem ser fontes de disseminação de microrganismos causadores de doenças.

Atualmente, a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um problema para a sociedade brasileira, dado o crescimento demográfico, o processo de urbanização, o consumismo da sociedade e o avançado crescimento tecnológico (SILVA, 2020).

No Brasil, a maior parte destes resíduos coletados tem como destino final os aterros sanitários, tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década (de 2010 a 2020), passando de 33 milhões para 43 milhões de toneladas. (ABRELPE, 2020).

À medida que a população do Brasil cresce, além do crescimento da quantidade de RSU gerados, há também uma maior demanda por energia, especialmente nas grandes cidades.

A principal fonte de energia em todo o mundo são os combustíveis fósseis, porém o suprimento de energia é muito menor do que a energia necessária em muitos países em desenvolvimento. (OUDA et al., 2016). Por isso, é preciso promover o uso de fontes de energia renováveis, minimizando o impacto ao meio ambiente.

Nesse aspecto, os resíduos sólidos urbanos, a depender da tecnologia utilizada, podem ser fontes de energia renováveis. No Brasil, apesar destas tecnologias serem menos difundidas do que em comparação aos países da Europa, Estados Unidos e Japão, essa é uma alternativa interessante para o país, tendo em vista a enorme quantidade de resíduos sólidos que são gerados e também a necessidade de novas fontes de energia.

Essa utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia tem dois grandes aspectos: a diminuição da quantidade de resíduos sólidos urbanos em aterros e a sustentabilidade energética.

2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é fazer um levantamento das diferentes rotas tecnológicas de geração de energia que utilizam como matéria-prima os resíduos sólidos urbanos e verificar o potencial de utilização destas rotas no Brasil.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

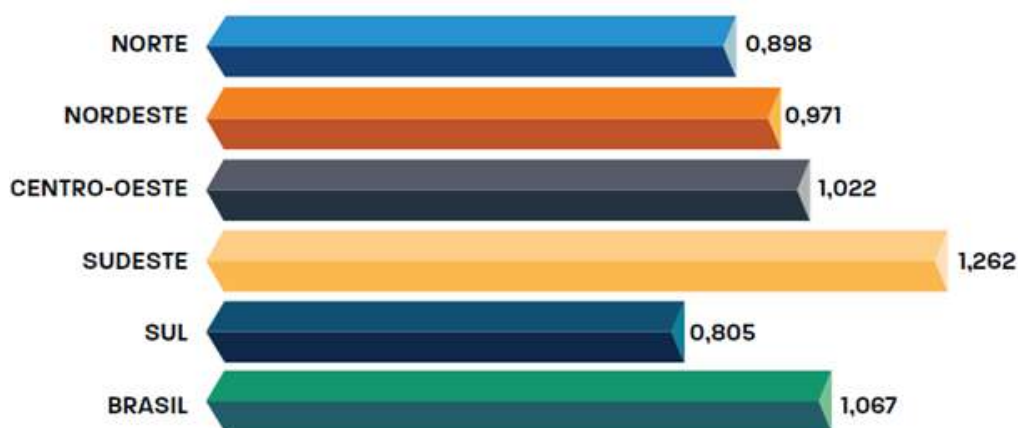
- Fazer um levantamento da situação atual do Brasil, levando em consideração os resíduos sólidos urbanos e as diferentes formas de tratamento e destinação.
- Fazer um levantamento das rotas tecnológicas de *Waste-to-Energy*, verificando seus maiores pontos positivos e negativos.
- Avaliar quais rotas tecnológicas poderiam ser melhor aplicadas no Brasil.
- Com foco nas rotas tecnológicas escolhidas, fazer um levantamento de onde são mais implementadas, no cenário mundial.
- Com foco nas rotas tecnológicas escolhidas, fazer um levantamento das usinas de aproveitamento energético do lixo implementadas e em fase de implementação no Brasil.
- Comparar o potencial da utilização das rotas tecnológicas escolhidas.

3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

Os resíduos sólidos são considerados, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), tudo que está em estado sólido e semissólido resultado de ações de origem agrícola, comercial, industrial, doméstica, hospitalar entre outras atividades. Este conceito abrange tudo aquilo que é proveniente de sistemas de tratamento de água, oriundos de equipamentos e de instalações de controle de poluição, assim como líquidos específicos cujas características químicas tornam inviável seu lançamento na rede pública de esgotos, ou em corpos d'água.

Segundo a ABRELPE (2020), com o aumento da geração de RSU no Brasil entre 2010 e 2019, o país se tornou o 4º maior produtor de lixo no mundo. E em 2021, foram gerados mais de 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo 390 kg por habitante. Dessa quantidade, a região Sudeste é responsável pela maior massa coletada, conforme a figura abaixo:

Figura 1 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil por regiões (em kg/hab/dia)



Fonte: ABRELPE, 2021.

Para que esses RSU sejam descartados da forma adequada, é necessário compreender a classificação dos mesmos e o perigo que eles apresentam não somente à natureza, mas aos seres humanos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10.004/2010, cataloga os resíduos em duas categorias, de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, que determinam quais devem ser as destinações dadas a eles:

- Resíduos Classe I: Perigosos, sendo os resíduos que apresentam periculosidade, podendo apresentar também inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- Resíduos Classe II: Não Perigosos, subdivididos em:
 - Classe A: Não Inertes, sendo estes considerados os resíduos que podem ser biodegradáveis, solúveis em água ou combustíveis.
 - Classe B: Inertes, aqueles que não são solúveis, nem inflamáveis e não sofrem reações físicas ou químicas.

Os resíduos sólidos também podem ser classificados em relação a sua fonte. A **Tabela 1** apresenta essa classificação, considerando a origem, a composição, os problemas que podem causar e as soluções para esses problemas, com o intuito de adequar seu tratamento e sua destinação.

Tabela 1 - Resíduos Sólidos: classificação, origem, composição, problemas e soluções.

Classificação	Origem	Composição	Problemas	Soluções
Domiciliar	Residências	Restos de alimentos; latas, vidros, papeis entre outros.	Proliferação de moscas, baratas, ratos; sujeidade em calçadas e ruas; maus odores.	Acondicionamento adequado; coleta frequente; higiene do local onde se coleta o lixo.
Comercial	Açougues, restaurantes, supermercados, lojas, bares, escritórios entre outros.	Restos de alimentos; caixas, papeis, vidros, latas, entre outros.	Iguais aos do domiciliar, porém em maior escala.	Orientação/ legislação própria; acondicionamento e coleta adequados ao volume e a composição.
Industrial	Indústrias em geral.	Produtos químicos; máquinas velhas; contêineres entre outros.	Poluição ambiental; ocupação de espaço útil entre outros.	Pré-tratamento na fonte; reaproveitamento de matérias-primas; legislação própria;

				fiscalização.
Público	Varrição de ruas; capinação e poda de parques e jardins; mercados e feiras livres; cadáveres de animais.	Cinzas, fuligem; terra, arbustos, gastos, caixas, papéis, restos de feira, restos orgânicos.	Entupimento de bueiros; enchentes; proliferação de moscas; dificuldades para o tráfego de pedestres e veículos, decomposição.	Limpeza das vias públicas; orientação à população; lixeiras públicas em calçadas, parques, jardins, entre outros.
Contaminado	Hospitais, ambulatórios, clínicas médicas entre outros.	Gaze, algodão cadáveres de animais e cobaias; seringas, agulhas, frascos, material de curativo; drogas, restos de tecidos humanos entre outros.	Contaminação e disseminação de doenças entre lixeiros e a população.	Acondicionamento especial, embalagem característica (sacos plásticos específicos, com identificação própria); incineração; orientação dos profissionais de saúde.
Radioativo	Usinas nucleares; radiologia de hospitais; indústrias.	Aparelhos de raios x; substâncias radioativas.	Contaminação de pessoas e do ambiente por radioatividade.	Rigorous controle técnico especializado e fiscalizado pelo governo.

Fonte: Carvalho e Oliveira (2010)

É importante conhecer a composição quantitativa e qualitativa dos resíduos para determinar o acondicionamento, coleta, transporte, processamento e armazenamento final dos resíduos para minimizar o potencial impacto ambiental causado por esses materiais.

E cada uma dessas etapas, a seguir, necessita investimentos que tem como objetivo o aprimoramento e a eficiência.

1. Acondicionamento: Segundo a NBR 13.463, os resíduos domiciliares devem ser acondicionados em recipientes rígidos, herméticos, saco plástico descartável ou em contêiner coletor ou intercambiável.
2. Transporte: Segundo a NBR 13.221/10, que estabelece as condições fundamentais do transporte urbano de resíduos, para os resíduos comuns, os caminhões que são usados nos transportes desse material podem ser com caçambas removíveis e caminhões do tipo basculante e tanques são utilizados para resíduos líquidos ou pastosos. Os veículos devem portar documentação que comprove sua capacitação, adequação e permissão ao transporte desses resíduos.
3. Compactação: Normalmente feita nos veículos de coleta, visando à diminuição do volume.

4. Triagem de resíduos: Onde cada tipo de resíduo é separado e identificado através de uma legenda com informações referentes ao tipo de resíduo e a fonte geradora, impossibilitando a associação e algumas incompatibilidades entre os resíduos (CARVALHO; OLIVEIRA, 2010).
5. Tratamento e Disposição Final: Os resíduos podem passar por algum tipo de processo com a finalidade de torná-los menos agressivos para a disposição final, que é feita em principalmente em lixões, aterros controlados ou aterros sanitários.

Ao escolher a técnica referente ao tratamento é essencial observar o reaproveitamento do material e a melhor técnica para o processo de destinação do tipo de resíduo, visando evitar danos e prejuízos econômicos, aos seres humanos ou ambientais.

3.2 DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

São necessários diferentes métodos e estratégias no tratamento e na disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos, tendo em vista evitar a contaminação do meio ambiente e a propagação de doenças aos seres humanos.

3.2.1 Disposição Final

Lixões são depósitos de lixo a céu aberto, sendo uma alternativa inadequada para o acondicionamento dos resíduos sólidos. O material descartado nesses locais pode contaminar o solo devido ao chorume que atinge tanto as águas superficiais como os lençóis freáticos. Nos lixões, ocorre a proliferação de diversos animais transmissores de doenças dentre eles: ratos, baratas, moscas e mosquitos.

Figura 2 – Foto de Lixão em Manaus



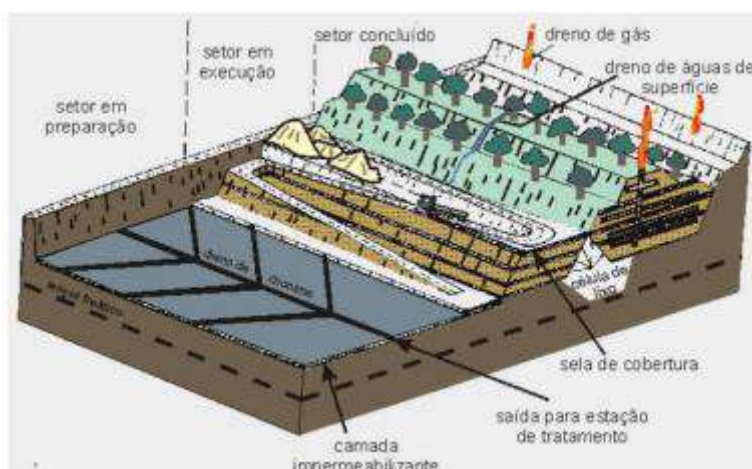
Fonte: Portal Saneamento Básico, 2019

Aterros, diferente dos lixões, são locais onde o resíduo é depositado de forma adequada, minimizando os impactos ambientais.

Existem dois tipos de aterros:

- Aterros controlados: Os resíduos sólidos são confiados de forma adequada, sem poluir o ambiente externo. Não há coleta nem o tratamento dos efluentes produzidos pelos resíduos.
- Aterros Sanitários: Os resíduos sólidos são confinados sobre terreno natural, confinados em camadas cobertas com material inerte. Nesse caso, são feitas a coleta e tratamento do chorume gerado, além da drenagem e queima do biogás gerado.

Figura 3 - Esquema de Aterro Sanitário

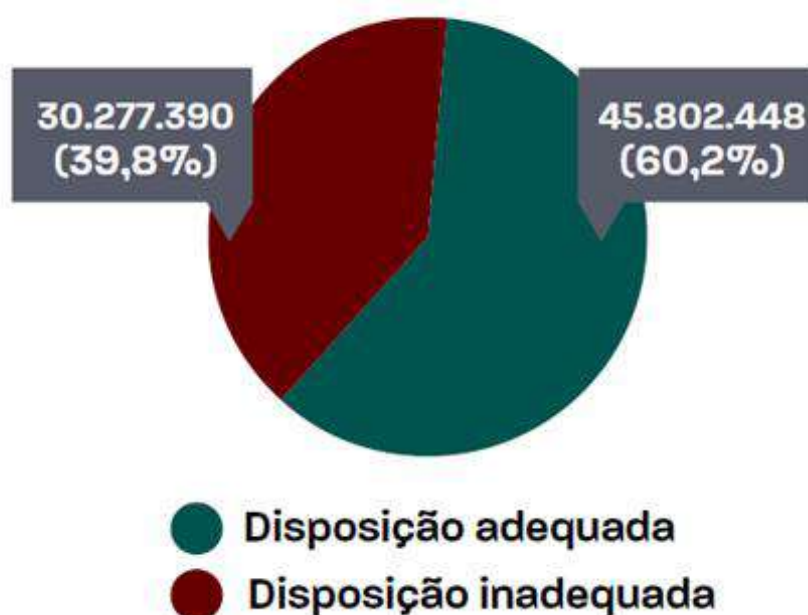


Fonte: Pereira, 2017

Os aterros sanitários são utilizados especificamente para armazenar resíduos sólidos proveniente da coleta de lixo e diversos resíduos industriais. A construção de um aterro deve ser feito preferencialmente em locais naturalmente impermeáveis, ou seja, que tenham o mínimo de saturação possível e onde os lençóis freáticos estejam localizados em uma profundidade grande o suficiente para que não haja risco de contaminação.

No Brasil, segundo a ABRELPE (2021), dos resíduos sólidos gerados em 2020, 76 milhões de toneladas foram coletadas, representando 92,2% do valor total. Destes, 60,2% tiveram como disposição final aterros sanitários, enquanto o resto, áreas de disposição inadequada, como lixões e aterros controlados.

Figura 4 – Disposição Final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %)



Fonte: ABRELPE, 2021

3.2.2 Coprocessamento

Técnica aplicada na eliminação térmica do resíduo usado nos fornos de cimento. Essa técnica utiliza resíduos que apresentam poder calorífico como potencial energético ou como substitutos parciais da matéria-prima na produção de clínquer. Com as altas

temperaturas, uma fração dos RSU é destruída totalmente e suas cinzas são incorporadas a massa de clínquer produzida, com isso dispensando o uso de aterros na disposição final.

A prática do tratamento conjunto de resíduos na indústria cimenteira tem se expandido devido à crescente necessidade de uma destinação mais eficiente ambiental e socialmente dos resíduos provenientes de diversos processos industriais (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

3.2.3 Landfarming

Técnica de destinação e tratamento dos RSU, através de reações físicas e químicas que ocorrem no solo devido à ação microbiológica, levando ao processo de biodegradação.

É um método simples que consiste na mistura do resíduo com as camadas de solo superficial. Por não ter presença de impermeabilização do solo, deve haver um monitoramento de forma contínua e rigorosa, e precisam ser tratados, para que determinem os cuidados e se definam a quantidade de microrganismos que serão aplicados e inseridos no próprio solo (CARVALHO; OLIVEIRA, 2010).

3.2.4 Coleta Seletiva e Reciclagem

Uma forma de diminuir os resíduos enviados a disposição final é o método de reciclagem, o qual promove diversos resultados positivos, sendo um dos principais a diminuição do volume e dos custos voltados à disposição dos materiais, além de proteger a fauna e a flora.

Para que a reciclagem seja realizada, os resíduos devem ser recolhidos através da coleta seletiva. O protocolo sobre essa coleta de resíduos está disposto no Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 275/01) que tem como simbologia as cores especificando os diversos tipos de resíduos, como visto na **Figura 5**:

Figura 5 – Coletores de Resíduos Sólidos



Fonte: EcoLog

Esta prática da separação dos resíduos facilita a reciclagem porque os materiais têm maior potencial de reaproveitamento e comercialização.

O caminhão da coleta seletiva não comprime os resíduos e após a coleta, eles seguem para triagem de materiais, onde os resíduos são separados de acordo com os diferentes tipos de material para a devida destinação.

A triagem pode ser feita por máquinas automatizadas que selecionam toneladas de materiais por dia e possuem equipamentos que separam os recicláveis por categoria (papéis, plásticos, metais, vidros e embalagens Tetra Pak), tamanho e cor.

O processo de separação requer ainda o trabalho manual realizado pelos funcionários das cooperativas, que fazem a triagem final dos materiais que passaram pela máquina. E assim, resíduos não reaproveitáveis seguem para aterros e os resíduos reaproveitáveis seguem para diferentes processos de acordo com a categoria.

Existem 3 tipos de reciclagem:

- **Reciclagem Mecânica:** Consiste na transformação dos resíduos em grânulos para a produção de novos produtos. É o processo de reciclagem mais utilizado no Brasil.
- **Reciclagem Química:** Consiste no processo complexo de reprocessamento dos resíduos, transformando sua estrutura química para a utilização como matéria-prima em diferentes segmentos. É a mais cara e requer grandes quantidades de resíduos.
- **Reciclagem Energética:** Consiste na transformação dos resíduos em energia térmica e elétrica, por meio da incineração.

Nesse trabalho, o foco será a reciclagem energética, que utilizando resíduos sólidos como fonte de energia, diminui o volume de resíduos em aterros sanitários e é importante para a criação de novas matrizes energéticas.

4 WASTE-TO-ENERGY (WTE)

Waste-to-Energy (WTE) é o processo de gerar energia, seja em forma de eletricidade ou calor, utilizando como matéria prima os resíduos sólidos urbanos, ou de transformar estes resíduos em combustível.

O avanço tecnológico, sistemas de controle de poluição aprimorados, incentivos governamentais e regulamentações rigorosas tornam o WTE uma alternativa em potencial. Não apenas como fonte de energia, como também como forma de reduzir os impactos nocivos que os resíduos sólidos têm ao meio ambiente.

Nessa perspectiva e objetivando alcançar a geração de energia, o aspecto da sustentabilidade requer uma revisão das estratégias na aplicação dessas tecnologias que são bastante utilizadas em países desenvolvidos como Estados Unidos, Alemanha, Japão entre outros (REIS; SILVEIRA, 2012).

Nesse tópico, serão apresentadas as diferentes rotas de *Waste to Energy*, suas vantagens e desvantagens.

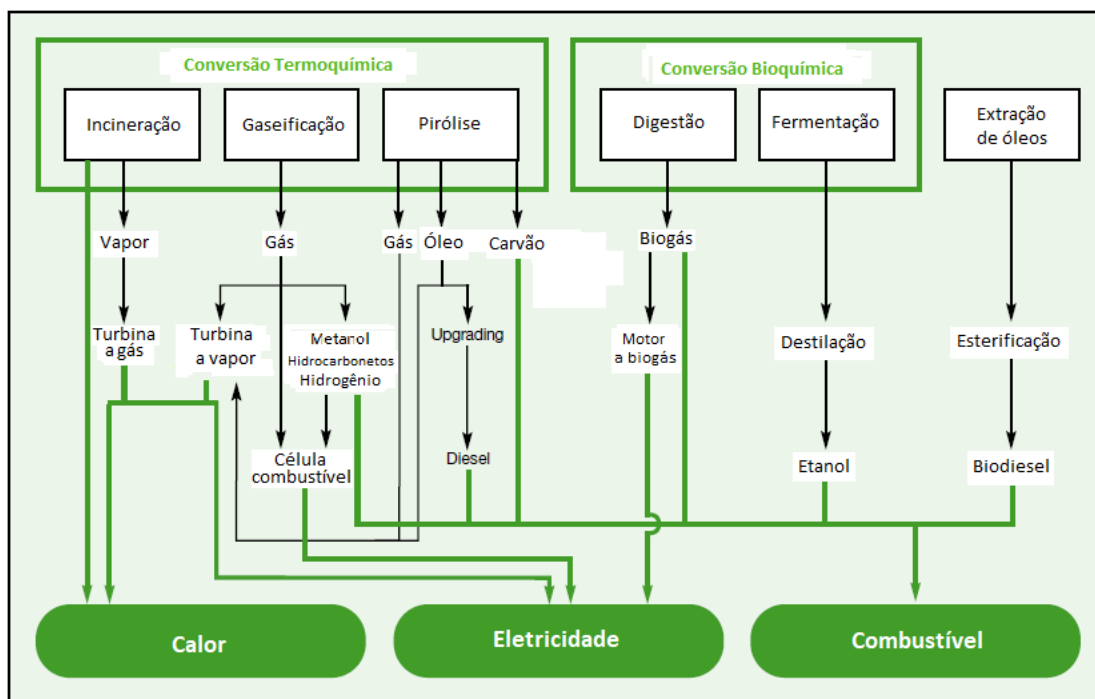
4.1 ROTAS TECNOLÓGICAS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS EM ENERGIA

A escolha de uma ótima tecnologia de processamento de resíduos não está apenas sujeita a requisitos econômicos e na recuperação de energia, mas também para buscar a conformidade regulatória ambiental exigências da área em questão.

As tecnologias de conversão de resíduos em energia podem ser categorizadas em três grupos:

- Processos de conversão termoquímica (incineração, pirólise, gaseificação),
- Processos de conversão bioquímica (digestão anaeróbica e fermentação),
- Processos de conversão físico-química (transformação de óleos vegetais em biodiesel).

Figura 6 – Rotas de Conversão de Resíduos Sólidos em Energia



Fonte: Adaptado de Turkenburg (2000)

4.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA

É feito um tratamento térmico da matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos, para produzir energia térmica, óleo combustível ou gás. É útil para resíduos com baixo teor de umidade e com alta porcentagem de matéria orgânica não biodegradável.

4.2.1 Incineração

A incineração é uma tecnologia bastante estabelecida e com alta eficiência no tratamento de resíduos, tendo como diferencial a grande capacidade de redução de volume, e a produção de energia.

O processo de incineração normalmente é aplicado em locais com pequena disponibilidade de área adequada para aterros devido à redução do volume de lixo.

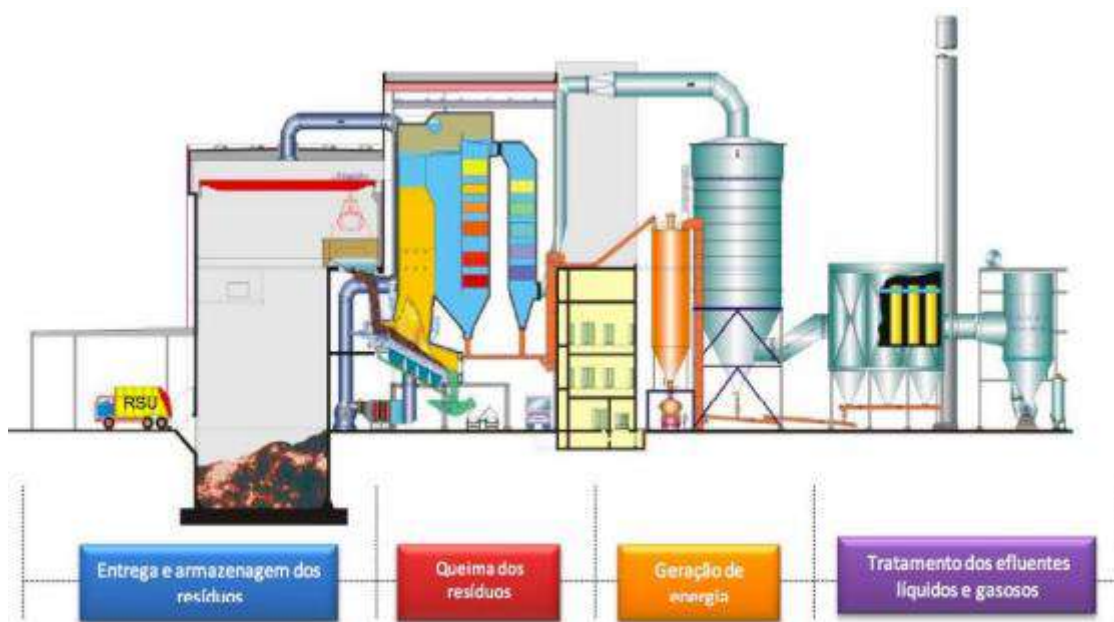
O método de incineração consiste na queima do resíduo sólido de maneira controlada em alta temperatura, com a participação do oxigênio, no qual o conteúdo orgânico é transformado em substância gasosa ou material inerte. No caso dos resíduos

sólidos urbanos, os compostos orgânicos são reduzidos a gases do efeito estufa, poluentes atmosféricos, outros gases e material particulado e a fração sólida, as cinzas.

O processo de incineração para o reaproveitamento energético é dividido nas seguintes partes, como observado na **Figura 7**:

1. Entrega e armazenamento dos resíduos.
2. Câmara de combustão, onde ocorre a queima dos resíduos.
3. Planta de recuperação energética, onde é gerada a energia.
4. Tratamento dos efluentes líquidos e gasosos.

Figura 7 – Diagrama do Processo de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos



Fonte: Silva, 2015

Existem diferentes tipos de incineradores, são os principais:

- Incinerador de Forno de Grelha: Os resíduos são queimados em uma grelha, onde são distribuídos de forma uniforme, permitindo a passagem do ar para fornecer oxigênio necessário à combustão. É comumente utilizado para resíduos municipais e industriais.
- Incinerador de Forno de Leito Fluidizado: Os resíduos são incinerados em um leito fluidizado de partículas inertes, como areia ou cinzas, que

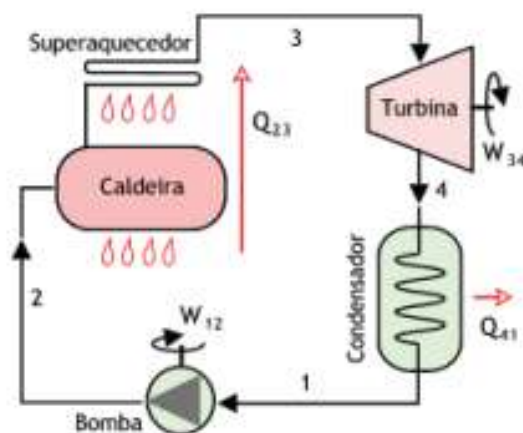
permite uma distribuição uniforme de calor e permite uma combustão eficiente dos resíduos.

- Incinerador de Forno de Incineração Rotativo: Os resíduos são alimentados em um forno rotativo, onde são expostos a altas temperaturas, garantindo a combustão completa dos resíduos.

Existem também diferentes sistemas de recuperação de energia que podem ser aplicados na incineração de resíduos, sendo os mais comuns:

- Caldeiras de recuperação: O calor gerado pela incineração é utilizado para aquecer a água, gerando vapor d'água em alta pressão, que é direcionado para uma turbina, que está conectada a um gerador, onde a energia mecânica é convertida em energia elétrica. O vapor é então resfriado em um condensador, que é bombeado de volta para a caldeira, configurando assim um ciclo de *Rankine*, como ilustrado na **Figura 8**:

Figura 8 – Ciclo Rankine



Fonte: Vicentini, 2011

- Caldeiras de calor: O calor gerado pela incineração é utilizado diretamente para aquecer água ou outros fluidos, que são utilizados em processos industriais ou fornecem energia térmica para sistemas de aquecimento.
- Cogeração: Um sistema que combina a produção de eletricidade e calor. O calor gerado durante a incineração é utilizado tanto para gerar

eletricidade como para fornecer energia térmica para aquecimento de edifícios, por exemplo.

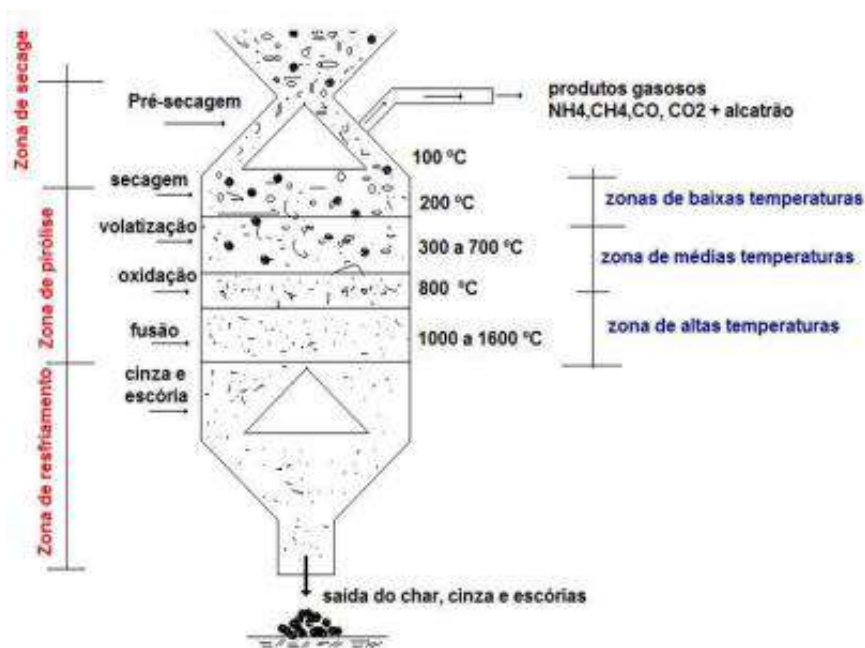
A incineração traz como benefício à diminuição do volume dos RSU, e a diminuição do seu potencial de toxicidade, enquanto gera energia, por meio da combustão. Uma das desvantagens desse processo é a poluição atmosférica causada pelos resíduos incinerados, além de ser um processo que demanda muito investimento e profissionais capacitados.

4.2.2 Pirólise

Outro processo de conversão termoquímica é a pirólise, que é identificado pela decomposição térmica quando não há oxigênio, ou é encontrado de forma insuficiente (SOBRINHO, 2017).

Na pirólise, ocorre a geração de elementos renováveis com característica de produzir energia como gás, óleo e o carvão. Dentre os países desenvolvidos, a Alemanha é uma das pioneiras na construção de uma usina de pirólise no processamento de resíduos urbanos (PAIVA *et al.*, 2018).

Figura 9 – Reator Pirólítico



O reator pirolítico é dividido em 3 zonas:

- Zona de secagem: A temperatura varia entre 100 a 150°C e os resíduos passam por duas etapas, a de pré-secagem e a de secagem, que são imprescindíveis, pois a umidade pode diminuir a eficiência do processo.
- Na zona de pirólise, a temperatura varia entre 300 a 1600°C e é onde ocorrem as reações endotérmicas de vaporização, oxidação e a fusão.
- E na zona de resfriamento, são coletados as cinzas e bio-óleo.

Esse processo permite a transformação dos resíduos em três frações:

- Fração sólida consiste em cinzas que podem ser utilizadas como combustível ou na fabricação.
- A fração gasosa é composta por H₂, CO, CO₂, CH₄ e outros hidrocarbonetos.
- A fração líquida é composta principalmente pelo bio-óleo, que é um combustível renovável.

4.2.3 Gaseificação

A gaseificação também é um processo termoquímico, sendo uma alternativa promissora na movimentação de turbinas a vapor, e quando integrada a biomassa envolve a tecnologia do ciclo *Brayton*, ou turbina a gás para a geração elétrica.

Essa tecnologia tem sua conduta pautada em acrescentar valor a qualquer material com menor ou nenhum valor, mas que possua em sua composição carbono, ao qual ocorre o processo de convertê-lo em gás de síntese, contendo em sua composição essencialmente o monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrogênio (H₂), aos quais podem gerar energia elétrica após serem queimados. (SILVA, 2021)

A **Tabela 2** traz a comparação entre as vantagens e desvantagens dos processos de incineração e gaseificação:

Tabela 2 - Comparação entre Gaseificação e Incineração

	Incineração	Gaseificação
Vantagens	Tratamento sanitário e a destruição de componentes orgânicos Recuperação Energética diretamente com o RSU	Redução volumétrica de até 90% Alta eficiência térmica global Eficiência é até 30% maior em relação à incineração Baixo Custo de filtros de limpeza Praticamente nenhum gás perigoso é expelido no ambiente Área requerida para a planta é limitada Produção de Syngas
Desvantagens	Limitação da Temperatura do Vapor Limitação da Eficiência Global Baixo controle de poluição Instalações enormes Baixa Eficiência Alta produção de Cinzas Alto custo de filtros para limpeza	Necessidade de Tratamento do RSU Baixa versatilidade Manutenção regular requerido para o sistema de limpeza

Fonte: Nogueira, 2015

A principal vantagem da gaseificação é diminuir o volume dos resíduos sólidos urbanos que tem a disposição final o aterro. Seu peso pode ser reduzido em 75% e o seu volume em até 90%. A quantidade de cinzas produzidas é cerca de 8 a 12%, enquanto no processo de incineração a quantidade de cinzas produzidas é entre 15 e 20%. Na gaseificação, o gás que é produzido possui 30% a menos de volume, em relação à incineração. (NOGUEIRA, 2015)

4.3 PROCESSOS DE CONVERSÃO BIOQUÍMICA

São processos de transformações de resíduos pela decomposição realizada por microrganismos, podendo ter como produtos líquidos ou gases.

4.3.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio. Nesse processo, os resíduos são decompostos por bactérias, gerando biogás, que pode ser usado como fonte de

energia, diretamente como combustível para eletricidade ou processado para produzir biocombustíveis.

A digestão anaeróbica ocorre através de reações bioquímicas que são divididas em quatro fases primordiais, ilustradas na **Figura 11**:

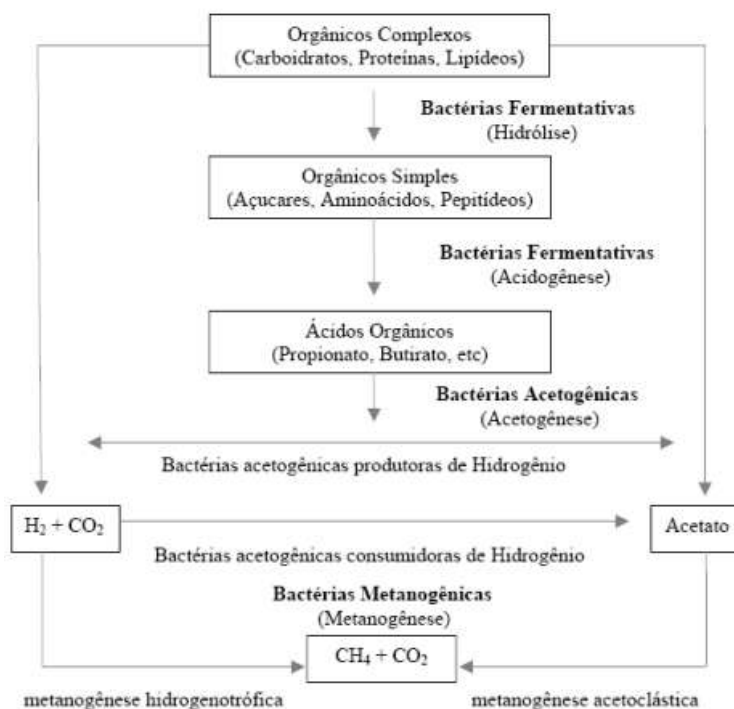
- Hidrólise: Degradação das moléculas complexas em substâncias simples, o que facilita a assimilação das bactérias fermentativas:



- Acidogênese: Transformação das substâncias em ácido propanoico, ácido láctico e álcoois, hidrogênio e gás carbônico, pelas bactérias fermentativas.
- Acetogênese: Transformação dos produtos da fermentação em ácido etanoico, hidrogênio e gás carbônico, pelas bactérias acetogênicas.
- Metanogênese: Conversão dos produtos da oxidação em metano e gás carbônico, pelas bactérias metanogênicas:



Figura 10 – Etapas da Digestão Anaeróbica

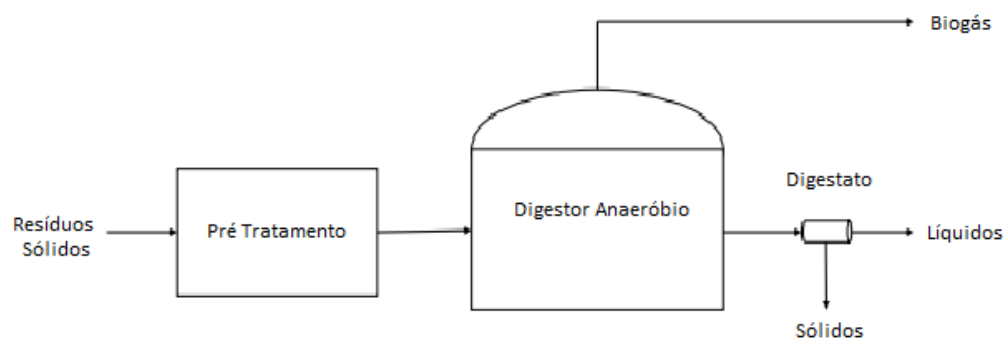


Sendo assim, a decomposição orgânica e de biomassa é realizada pelos carboidratos representados pelos lipídeos, proteínas e outros nutrientes quando se está associado a bactérias ocorre a formação do metano e de algumas impurezas nesse processo o dióxido de carbono que foi produzido se une à amônia e o enxofre passa a ser um resíduo resultando no biogás estrutural é $\text{CH}_4:\text{CO}_2$: 71%: 29% (ARAÚJO, 2017).

O processo de digestão anaeróbia é dividido em etapas, são elas:

1. Pré-tratamento
2. Digestor Anaeróbio
3. Produção de biogás
4. Digestato: Após a digestão anaeróbia, o material restante no biodigestor, chamado de digestato, é removido. O digestato é um material parcialmente decomposto, rico em nutrientes, que pode ser utilizado como fertilizante orgânico para a agricultura.

Figura 11 – Processo de Digestão Anaeróbia



Fonte: Adaptado de Logan e Visvanathan, 2019

Existem diferentes tipos de reatores utilizados na digestão anaeróbia de resíduos para a produção de energia. Os principais são:

- Reator de Fluxo Contínuo (CSTR - *Continuous Stirred-Tank Reactor*): O resíduo é alimentado continuamente e misturado com o meio digerido em um tanque de

agitação. A mistura é mantida em condições anaeróbias, permitindo a decomposição dos resíduos e a produção de biogás.

- Reator de Fluxo Ascendente (UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*): Consiste em um tanque vertical onde o resíduo é alimentado na parte inferior e flui para cima. No interior do tanque, há uma manta de lodo anaeróbio que retém a biomassa. À medida que o resíduo flui para cima, ocorre a digestão anaeróbia e a produção de biogás.
- Reator de Fluxo de Leito Fixo (AFBR - *Anaerobic Fixed-Bed Reactor*): Esse reator é preenchido com um meio de suporte, como pedras, cascalho ou plástico, no qual a biomassa adere. O resíduo é alimentado no topo do reator e flui através do meio de suporte, permitindo a digestão anaeróbia e a produção de biogás.
- Reator de Fluxo de Manta de Lodo (AFMBR - *Anaerobic Fluidized Bed Membrane Reactor*): Combina a digestão anaeróbia em um reator de leito fluidizado com a filtração de membrana. O resíduo é alimentado no reator, onde ocorre a digestão anaeróbia. A presença da membrana separa a biomassa do líquido digerido, permitindo a recirculação do líquido e a produção de biogás.

É uma das opções mais práticas devido ao seu tempo de desenvolvimento tecnológico e pela sua estabilidade técnica. Pode ser aplicada para resíduos orgânicos úmidos homogêneos e heterogêneos, característica dos resíduos sólidos urbanos.

Plantas de digestão anaeróbica são comumente combinadas com aterros sanitários, e por isso, a difusão desta tecnologia é maior, tendo em vista que o aterramento sanitário é a opção política e tecnológica para tratamento de resíduos mais utilizada no mundo. Por isso, no Brasil, por exemplo, o reator mais utilizado é o de Fluxo Contínuo, devido a sua simplicidade operacional, eficiência na estabilização dos resíduos e capacidade de adaptação aos substratos.

Um fator que favorece a utilização da Digestão Anaeróbia é o custo baixo dos equipamentos utilizados na captura de gás metano em aterros sanitários, quando comparados com outros métodos de conversão.

4.3.2 Fermentação

A fermentação alcoólica é um processo bioquímico no qual ocorrem reações químicas controladas por enzimas, transformando os açúcares em etanol e gás

carbônico. Ao utilizar resíduo como matéria-prima, tem como produto final o Bioetanol (Etanol de 2ª Geração).

O processo da fermentação se dá em três fases:

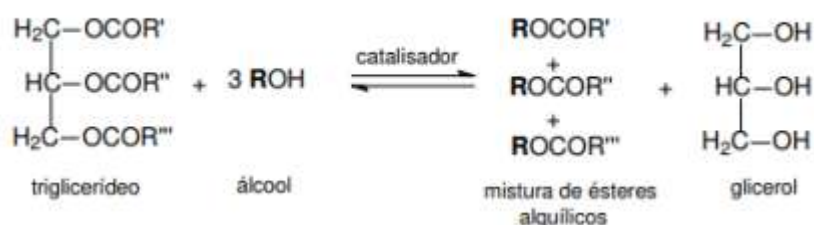
1. A fase preliminar (lag): Tem como principal característica a multiplicação das leveduras, consumindo o açúcar e dando início a produção de etanol. A temperatura nessa fase aumenta e começa a ocorrer liberação de CO₂.
2. A fase tumultuosa: Intensa produção de álcool e liberação de CO₂. A temperatura também se eleva.
3. Fase complementar: A liberação de gás diminui e os açúcares no meio são todos consumidos.

O Bioetanol pode ser obtido de diferentes matérias-primas, como o milho, a cana-de-açúcar, mandioca, bagaço de cana, resíduos florestais, entre outros.

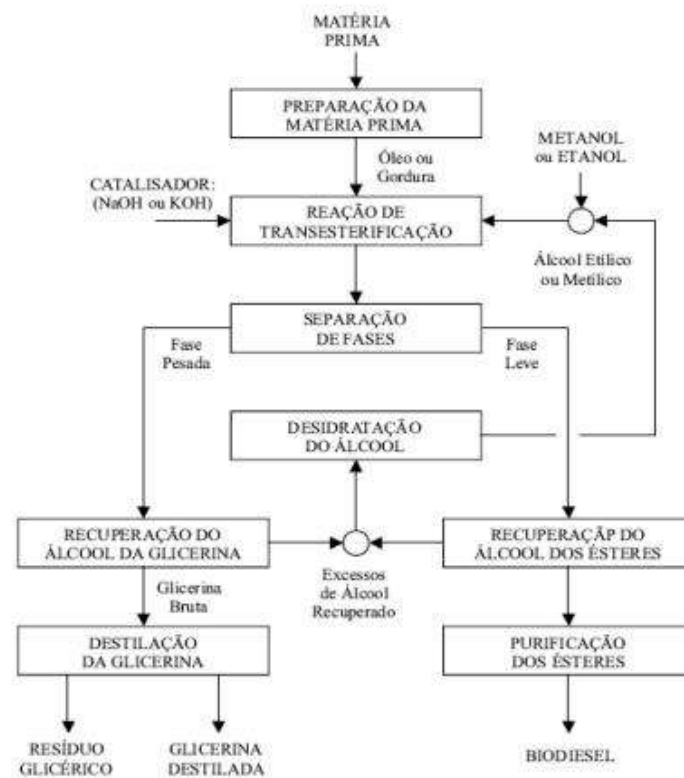
4.4 PROCESSOS DE CONVERSÃO FÍSICO-QUÍMICA

Através da síntese física e química é possível a transformação, por exemplo, de óleos vegetais, provenientes de sementes de girassol, soja, entre outros, em biodiesel. Esse processo é baseado em uma reação química de transesterificação, onde óleos vegetais reagem com um álcool na presença de um catalisador para produzir ésteres alquílicos (biodiesel).

Usualmente, as reações químicas realizadas ocorrem a partir do processo de transesterificação com a utilização de catalisadores alcalinos, ácidos ou enzimáticos e metanol ou etanol.



A partir da reação de transesterificação, é feita uma separação de fases e a fase leve é purificada, para formar o biodiesel:

Figura 12 – Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel

Fonte: Delatorre, 2011.

Entre as rotas citadas anteriormente, as mais usuais para a conversão de RSU em energia são a digestão anaeróbia, que ocorre principalmente em aterros sanitários e é conhecida como tecnologia de aproveitamento do gás de lixo, e a combustão através do processo de incineração. Por isso nesse trabalho, o foco será nas duas, visando comparar a difusão das mesmas no país e no mundo, assim como suas vantagens e desvantagens.

5 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre resíduos sólidos, sua classificação e destinação prioritariamente em livros didáticos, revistas científicas e documentos legislativos.

Foi feito um estudo sobre as diferentes tecnologias de geração de energia utilizando resíduos sólidos (*Waste-to-Energy*) em artigos e monografias, buscando os processos, as problemáticas e as vantagens, através de palavras-chaves como “Waste-to-Energy”, “incineração”, “pirólise”, “gaseificação”, “digestão anaeróbica” e “fermentação” em artigos que datavam os últimos 10 anos.

Com foco nos processos de incineração e digestão anaeróbica, foi feito um estudo da difusão dessas tecnologias pelo mundo, com enfoque nos países que mais utilizam cada uma e os motivos para isso. As palavras-chaves utilizadas foram “usinas de biogás”, “biogás”, “incineração” e “usinas de recuperação energética”.

Foram também consultados dados documentais sobre a difusão das tecnologias estudadas no mundo e no Brasil, além das políticas públicas ligadas a elas, visando comparar o potencial de utilização das rotas no país.

6 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO MUNDO

Waste to energy é uma opção bastante utilizada em países que possuem uma política pública de gestão de resíduos eficiente, estabelecida por regulamentos nacionais (BIZEK, 2020).

Vale ressaltar que as WTE são soluções tecnológicas mais usadas em países que priorizam ação referente à destinação dos RSU.

6.1 PLANTAS DE WTE QUE UTILIZAM INCINERAÇÃO

A incineração é uma das tecnologias de WTE mais difundidas no mundo, existem cerca de 2.500 usinas, sendo mais utilizada no Japão, na China, em grande parte da Europa, na Coreia do Sul e nos Estados Unidos, como é possível ver na **Figura 14**. A difusão dessa tecnologia nestes países se dá principalmente na limitação geográfica, na maioria das vezes em áreas mais urbanas.

Figura 13 – Localização de usinas WtE que utilizam o processo de incineração



Fonte: Waste Atlas, 2022

Os países que mais utilizam têm densidades populacionais altas, porém áreas geograficamente limitadas. A incineração permite reduzir o volume de resíduos, economizando espaço em aterros sanitários, que são escassos nessas regiões.

Estima-se que somente na Europa, as usinas WTE tratam cerca de 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, gerando aproximadamente 32.000 GWh de energia elétrica e evitando, em média, a emissão de 30 milhões de toneladas de CO₂ (MULLER; ARRUDA; FILHO, 2018).

De acordo com as estatísticas de 2017, 6% dos resíduos domésticos na UE são reciclados ou incinerados. A dispensa de resíduos sólidos em aterros é quase mínima em países como a Áustria, a Alemanha, a Bélgica, a Dinamarca, a Finlândia, os Países Baixos e a Suécia. Nos países citados, a incineração e a reciclagem exercem funções essenciais na geração de energia (PARLAMENTO EUROPEU, 2022).

Alemanha, França, Holanda, Suécia, Itália e Reino Unido são responsáveis por três quartos da capacidade de combustão da UE. A maior capacidade de queima per capita está na Suécia e na Dinamarca, 591 kg por pessoa e 587 kg por pessoa, respectivamente (COMISSÃO EUROPEIA, 2017).

Porém, existe a incineração tem uma grande problemática que é a emissão de gases poluentes na atmosfera causando impacto ao meio ambiente, principalmente por monóxido de carbono formado devido à combustão incompleta.

6.2 PLANTAS QUE UTILIZAM DIGESTÃO ANAERÓBICA

No processo de Digestão Anaeróbica, os resíduos sólidos urbanos produzem biogás, que pode ser usado para alimentar incineradores, produzindo energia elétrica. De acordo com a IRENA (2021), a capacidade mundial de geração de energia elétrica com biogás como matéria-prima no ano 2000 era de 2.455 MW.

Durante as últimas duas décadas, devido a políticas públicas ligadas a sustentabilidade, houve uma expansão do número de plantas de biogás para geração elétrica, atingindo em 2020 a capacidade instalada de 20.150 MW.

Sete países (Alemanha, EUA, Reino Unido, Itália, China, França e Brasil) possuem 73,8% das plantas de produção de energia elétrica com biogás, no mundo. A capacidade instalada no Brasil corresponde a 2,1% da capacidade mundial. Porém, com base nos dados da ANEEL (2021) a capacidade instalada no Brasil equivale a 1,5%.

Figura 14 – Países com maior geração elétrica por biogás

País	Capacidade (MW)	Fonte
Alemanha	7.459,00	IRENA (2021)
EUA	2.291,00	IRENA (2021)
Reino Unido	1.858,00	IRENA (2021)
Itália	1.432,00	IRENA (2021)
China	903,30	IRENA (2021)
Turquia	748,00	IRENA (2021)
Tailândia	554,30	IRENA (2021)
França	511,00	IRENA (2021)
Brasil	417,20	IRENA (2021)
República Checa	368,00	IRENA (2021)

Fonte: Irena, 2021.

Só na Europa existem mais de 14 mil usinas de biogás, a maior parte se encontra na Alemanha, onde, em 1994, foi estabelecida a “Lei de Economia Circular e dos Resíduos”, que dispõe sobre a promoção da economia circular, segurança e manejo dos resíduos.

Além disso, na União Europeia, destaque em *Waste-to-Energy*, a legislação ambiental é área central da política, estabelecendo diretrizes e regulamentos que devem ser consideradas nas legislações dos países do bloco.

7 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LIXO NO BRASIL

À medida que a população do Brasil cresce para mais de 212 milhões, também cresce a demanda por energia, especialmente nas grandes cidades. Segundo dados da Energy Research Company, o consumo de eletricidade foi de cerca de 2 TWh em 2018, mas estima-se que até 2026, o gasto total de eletricidade do Brasil poderá aumentar em 75%, chegando a 7 TWh.

Sendo assim, é necessário promover o uso de fontes de energia renováveis que possam atender às necessidades energéticas do país, minimizando o impacto no meio ambiente. Enquanto isso, o país é o 4º maior produtor de lixo do mundo. Por isso, os resíduos sólidos são uma alternativa viável na produção de energia elétrica limpa.

As soluções tecnológicas para promover uma gestão dos resíduos sólidos com menor impacto ambiental já existem, porém no Brasil ainda há uma necessidade de aprimorar o processo de incineração, assim como a geração de biogás (FERNANDES, *et al.*, 2022).

A capacidade técnica e financeira dos governos locais, articulação regional, conscientização e participação da população e da iniciativa privada, além da necessidade de investimentos e ações de infraestrutura e desenvolvimento tecnológico por parte de governos estaduais e federais, são barreiras comumente identificadas nas políticas urbanas em países em desenvolvimento e no Brasil.

7.1 MARCO REGULATÓRIO DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida em 2010, define diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos no Brasil, com o objetivo de promover a sustentabilidade.

Ao ser implementada, a PNRS estipulou o prazos para que os municípios, variando a data limite de acordo com a população da cidade, regularizassem a disposição final de RSU, criando diretrizes, planos e linhas de crédito para que as diferentes realidades socioeconômicas pudessem resolver em definitivo a problemática do RSU. (SCHMIDT, 2020).

A recuperação energética de resíduos sólidos urbanos foi prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305 de 2010, conforme §1º do art. 9º:

Art. 9º Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Apesar disso, é preciso tempo para que a recente política brasileira de resíduos sólidos evolua e alcance ainda mais competência, ampliando o número de municípios com coleta seletiva e a diminuição de lixões ou aterros controlados (FILHO; SOUSA; JUNIOR, 2020).

A criação de políticas públicas orientadas à elaboração e à distribuição de tecnologia e inovação promove o aumento dos sistemas tecnológicos, objetivando a eficiência. Produzindo, dessa maneira, um ambiente satisfatório, que permitirá o alicerce a execução dessas novas tecnologias (STEFANELLO; MARANGONI; ZEFERINO, 2018).

7.2 USINAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

O Brasil ainda não possui nenhuma usina de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos em operação. E até 2021, ainda não havia nenhuma usina desse tipo em implementação.

Porém, em 2021, o Ministério de Minas e Energia realizou o Leilão de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração, denominado Leilão de Energia Nova A-5 de 2022, pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Este leilão se refere à contratação de energia elétrica gerada por novos empreendimentos provenientes de diversas fontes renováveis e em 2021, foi incluída a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, nos termos da Portaria Interministerial nº274 de 2019, ou seja, incineração de RSU.

Foram cadastrados 12 projetos de resíduos sólidos urbanos, totalizando 315 MW para este combustível, que foi licitado na modalidade “por disponibilidade”, com período de suprimento de 20 anos (EPE, 2021) e início de suprimento de energia em 1º de janeiro de 2026, conforme a Portaria Normativa nº10.

A empresa vencedora para resíduos sólidos urbanos foi a Usina de Recuperação Energética (URE) localizada em Barueri, São Paulo. Essa foi a primeira vez que foi contratado um projeto com geração a partir de Resíduos Sólidos Urbanos.

Neste momento, essa usina está em fase de implantação e terá capacidade para tratar 825 t/dia, com potência instalada de 20 MW de energia, garantia física vendida de 16 MW, com preço médio de R\$ 549,4/MWh. (ANEEL, 2021; EPE, 2021).

Duas outras plantas receberam suas licenças ambientais: uma em Mauá, São Paulo, projetada para tratar 4.000 t/dia de resíduos e potência instalada de 80 MW, outra no Caju, Rio de Janeiro, projetada para tratar 1.200 t/dia (cerca de 14% dos resíduos coletados em toda cidade do Rio de Janeiro) e potência instalada de 30 MW, o suficiente para abastecimento de uma população de 200 mil pessoas (PLANARES, 2020).

7.3 GERAÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL

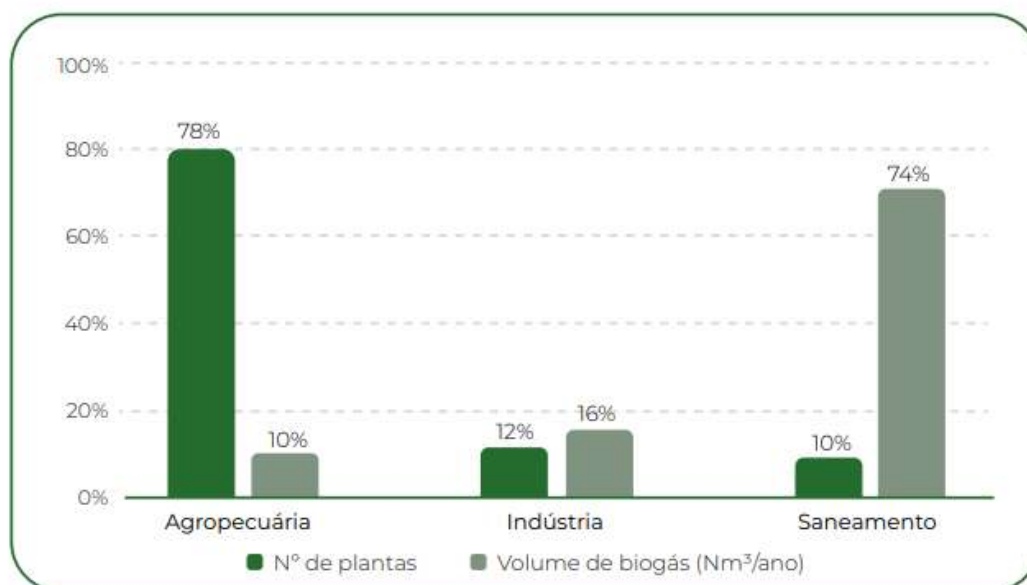
No Brasil, algumas usinas e instalações estão dedicadas à digestão anaeróbica como parte de seus processos de gestão de resíduos orgânicos. Algumas dessas usinas estão localizadas em aterros sanitários, enquanto outras são independentes e focadas especificamente no tratamento de resíduos orgânicos por meio da digestão anaeróbica.

O Brasil, com sua agricultura e pecuária prósperas, tem boas oportunidades de usar resíduos agrícolas na produção de biogás e, portanto, na produção de energia. O biogás é utilizado principalmente de três formas: produção de energia térmica, produção de eletricidade e produção de biometano (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

Na matriz elétrica brasileira, atualmente com 184.400 Megawatts (MW) de capacidade instalada, as usinas de biogás no Brasil estão mais inseridas no segmento de biomassa, que é amplamente difundida. Atualmente, o país é um dos maiores geradores de energia por biomassa. O maior volume de aplicação da energia termelétrica a partir da biomassa está na cogeração industrial, utilizando restos do processo.

Segundo o Panorama do Biogás no Brasil, de 2022, do CIBiogás, o setor de Saneamento, que inclui aterros sanitários, usinas de tratamento de resíduos orgânicos e estações de tratamento de esgoto, detém apenas 10% do número de plantas de biogás em operação, mas foi o responsável por 74% do volume de biogás produzido em 2022.

Figura 15 – Número de Plantas e Volume de Biogás por Setor



Fonte: CIBiogás, 2022

A geração de energia elétrica é a principal aplicação energética nas plantas em operação no setor (75 plantas), correspondendo a 87% do total e destinando 1,5 bilhão de Nm³/ano (75%) em 2022 para este fim. A potência média instalada nestas unidades é de 1,5 MWe (CBIogás, 2022).

Dentro do setor de saneamento, 96% das plantas em operação são os aterros sanitários. Porém existem também plantas que são alimentadas por diferentes aterros, como é o caso da Central de Tratamento de Resíduos, em Nova Iguaçu.

Na CTR, foi inaugurado em 2018 um sistema de produção de energia elétrica a partir do Biogás produzido pela decomposição dos resíduos sólidos. A usina tem capacidade de 16,5 MW e a energia produzida será comercializada no mercado para consumidores livres e em leilões de energia elétrica.

O Paraná tem a maior diversidade de tecnologias e plantas para geração de energia do país, isso se dá principalmente por políticas públicas como a RenovaPR, Programa Paraná Energia Rural Renovável, iniciativa do Governo do Estado que estimula a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

A CSBioenergia, formada pela estatal Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e o grupo Cattalini Bio Energia, é a responsável por instalar a primeira usina do Brasil que gera biogás a partir de esgoto e resíduos sólidos urbanos, com capacidade de 2,8 MW. Na usina, o material inorgânico é separado do orgânico, que é transportado para a biodigestão com o lodo do esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto de Belém.

Além destas, existem 18 plantas de biogás que será destinado à energia elétrica em implantação. Dessas, 96% são voltadas para a produção de biogás a partir de Resíduos Sólidos ou Esgoto.

8 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A tecnologia de *Waste to Energy* é uma abordagem que visa aproveitar os resíduos sólidos como fonte de energia e as duas tecnologias focadas nesse trabalho (a incineração e a digestão anaeróbia) são amplamente utilizadas. Ambas possuem características distintas e oferecem benefícios específicos:

Tabela 3 - Comparação entre Incineração e Digestão Anaeróbia de RSU

Aspecto	Incineração	Digestão Anaeróbia
Processo	Queima de resíduos sólidos em altas temperaturas	Decomposição biológica de resíduos orgânicos
Matéria-prima	Resíduos sólidos urbanos, incluindo orgânicos, plásticos, papel, madeira, tecidos, metais e materiais não recicláveis	Resíduos orgânicos, como restos de alimentos, resíduos agrícolas, lodo de esgoto, entre outros
Fonte de Energia	Produção de calor, que é convertido em eletricidade	Produção de biogás (metano), que é convertido em eletricidade
Emissões	CO ₂ , CO, NO _x , SO ₂ e Material Particulado	CH ₄ , CO ₂
Tratamento de Resíduos	Redução do volume dos resíduos, destruição de substâncias perigosas	Conversão de resíduos orgânicos em fertilizantes
Impacto ambiental	Emissão de gases, poluição do solo e da água e disposição das cinzas	Emissão de metano, uso excessivo de água, manejo do digestato
Viabilidade Econômica	Custo inicial alto de infraestrutura e manutenção	Custo inicial moderado e geração de receita, com a venda de biogás e fertilizante

Fonte: Autora

Os benefícios da incineração são a redução significativa do volume de resíduos, minimizando a necessidade de espaço para aterros sanitários, a geração de energia elétrica e calor que podem ser aproveitados para suprir demandas locais e a possibilidade de destruição de resíduos perigosos e redução dos riscos associados ao seu manuseio.

Porém, a incineração tem maiores emissões de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e material particulado, que requerem sistemas de controle para minimizar os impactos ambientais, além do potencial de liberação de substâncias tóxicas contidas nos resíduos durante o processo de incineração e a dependência de resíduos sólidos com alto poder calorífico para manter a eficiência do processo.

Enquanto os benefícios da digestão anaeróbia são a transformação de resíduos orgânicos em biogás, uma fonte de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a geração de subprodutos que podem ser utilizados como fertilizante agrícola e a redução da quantidade de resíduos orgânicos destinados a aterros sanitários, evitando a maior emissão de metano, um potente gás de efeito estufa.

Porém, existe uma limitação na capacidade de processar grandes volumes de resíduos, especialmente resíduos não orgânicos e uma necessidade de um suprimento constante de resíduos orgânicos para manter a eficiência do processo.

Em resumo, a incineração é mais eficaz na redução de volume e na geração de eletricidade e calor, mas requer sistemas de controle de poluentes. Enquanto, a digestão anaeróbia valoriza resíduos orgânicos, produzindo biogás e subprodutos úteis, mas enfrenta limitações em relação ao volume e ao tipo de resíduo.

A escolha entre as tecnologias depende das características dos resíduos, dos requisitos locais e das preocupações ambientais, levando em consideração diversos fatores, sendo os principais:

- Composição dos resíduos:

A incineração é mais amplamente aplicável a uma variedade de resíduos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, enquanto a digestão anaeróbia é mais focada no tratamento de resíduos orgânicos.

Os resíduos orgânicos são a maior porcentagem dos RSU gerados no Brasil, sendo assim, a digestão anaeróbia é uma tecnologia mais eficiente nesse caso, convertendo-os em biogás e fertilizantes.

- Disponibilidade de Resíduos:

Ambos os processos dependem do suprimento constante de resíduos sólidos para manter a eficiência do processo.

Como o Brasil possui uma grande quantidade de resíduos orgânicos disponíveis, tanto em áreas urbanas como rurais, haverá um suprimento constante matéria-prima para o processo.

- Impacto ambiental:

A digestão anaeróbia é considerada uma opção mais sustentável, gerando menos emissões atmosféricas do que a incineração e produzindo biogás, uma fonte de energia renovável que pode substituir combustíveis fósseis. Além disso, a digestão anaeróbia pode ser combinada com a produção de biofertilizantes, contribuindo para a agricultura sustentável.

- Viabilidade econômica:

É necessário analisar os custos de implantação, operação e manutenção de cada tecnologia, levando em consideração os incentivos e políticas de suporte existentes no país. Além disso, a possibilidade de geração de receita a partir dos subprodutos (como eletricidade, calor e fertilizantes) também deve ser considerada.

Analisando esses fatores, é possível concluir que ambas as tecnologias são viáveis no Brasil, mas a digestão anaeróbia emerge como a opção mais adequada para o país, principalmente devido ao grande número de aterros sanitários.

Pode-se notar também que existem plantas em operação utilizando a digestão anaeróbica, mas também existe uma boa quantidade de usinas em implantação ou com licença prévia, utilizando as duas rotas tecnológicas, mostrando o crescimento e um maior investimento nesse setor.

Além disso, como visto no caso da Europa, o desenvolvimento de políticas públicas e regulamentações adequadas é fundamental para promover a adoção dessas tecnologias de forma responsável e sustentável, levando em consideração os aspectos sociais, ambientais e econômicos.

Dessa forma, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, de 2010, é muito importante nesse aspecto, porém ainda recente quando comparada com a Lei de Economia Circular e dos Resíduos, publicada em 1994, na Alemanha, destaque em *Waste-to-Energy*.

O desenvolvimento e a implementação efetiva dessas políticas e regulamentações é o que torna possível o aproveitamento energético por *Waste-to-Energy*, diminuindo o impacto ambiental dos resíduos sólidos urbanos e melhorando a sustentabilidade energética do Brasil.

9 REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. **Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021.

AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (IEA). Geração de energia está menos suja desde início da guerra, diz S&P Global, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/assunto/iea/>. Acesso em: 11 dez, 2022.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbio.** (Monografia ao curso de Bacharel em química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos do Brasil.** Gestão adequada dos resíduos a excelência do setor, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/> Acesso em: 27 set, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004: Resíduos Sólidos: Classificação.** São Paulo, 2004.

AVELINO, Guilherme Monteiro. **A reciclagem química como alternativa ao tratamento de resíduos plásticos no Brasil.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

BORGES, F. Q. Crise de energia elétrica no Brasil: uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218**, [S. l.], v. 2, n. 10, p. 1-11, 2021.

CARVALHO, Anésio Rodrigues de; OLIVEIRA, Mariá Vendramini Castrignano de. **Princípios Básicos do saneamento do Meio.** 10^a ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2010.

CIBiogás – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS-BIOGÁS, **Panorama do Biogás no Brasil 2022.** Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022-agradecimento>. Acesso em: 01 dez. 2023

COMISSÃO EUROPEIA. **O papel da produção de energia a partir de resíduos na economia circular.** Bruxelas, 26 Jan, 2017. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN>. Acesso em: 10 dez, 2022.

CORRÊA, Adely Ribeiro Meira. Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: um estudo sobre barreiras na implantação de uma cadeia de fornecimento waste-to-energy. **Bioenergia em revista: diálogos**, ano/vol. 11, n. 2, p. 69-90, julho/dez 2021.

DELATORRE, A. B., et al. Produção de Biodiesel: considerações sobre as diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas de processos. **Perspectivas online**, v.1, n.1, p. 21-47, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2022: Ano base 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 25 jan. 2023

FILHO, Francisco Orlando Holanda Costa; SOUSA, Déborah Pâmela Freire de; JUNIOR, Francisco Humberto de Carvalho. **Panorama das gestões americana e brasileira de resíduos sólidos urbanos: desafios e méritos alcançados**. *Conex. Ci. e Tecnol.* Fortaleza/CE, v. 14, n. 2, p. 98 – 102, 2020.

GOMES, T. M. A. **Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos: uma revisão da leitura**. TCC (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) - Campus de Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018.

GONÇALVES FERREIRA, R. Impactos Ambientais Decorrentes do Lixão da Cidade de Condado-PB. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 21, n. 3, p. 142–151, 2017.

KOTHARI, Richa; TYAGI, V.V.; PATHAK, A. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14(9), p. 3164-3170, 2010.

LOGAN, M.; VISVANATHAN, C. Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. **Waste Manag. Res.**, n. 37, p. 27–39, 2019

PASSOS IBIAPINA, I. R.; OLIVEIRA, T. E.; LEOCADIO DA SILVA, A. L. As políticas públicas e os resíduos sólidos urbanos na Alemanha e no Brasil. **Planejamento e Políticas Públicas**, [S. l.], n. 60, 2022.

JUNIOR, Alex Air Santiago. Aterro sanitário: relevância e técnicas de impermeabilização do solo. **Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar**, Matinhos, v. 13, n. 2, p. 142-153, jul./dez. 2020.

MACHADO, Walter Diniz Gusmão. **Caracterização dos resíduos sólidos no Município de Comercinho – MG**. (Especialista em gestão hídrica e ambiental). Universidade Federal do Paraná, p. 42, 2010.

MILANEZ, Artur Yabe; SILVA, Guilherme Baptista da; GUIMARÃES Maia Diego Duque. **Biogás: recente e Evolution and potential of a new frontier for renewable energy in Brazil**. BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar. 2021.

MORAES, Luana Cristina Rodrigues de (*et al*). Processo pirólise para decomposição do lixo urbano. **Revista Pesquisa e Ação**, vol.1, n.1. p.1-8, 2015.

MORAIS, Bruna Cravo de; BARREIROS, Ingrid Zanchetta. **A Gestão da Matriz Energética no Brasil: Uma Análise dos Últimos 20 Anos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) – Universidade Federal Fluminense, 2022

NOGUEIRA, Yanne Cardoso Troccoli de. **Viabilidade técnica e econômica de usinas “Waste-To-Energy”**. (Curso de engenharia mecânica). Universidade de Brasília, 09 de dezembro de 2015.

OUDA, O.K.M., Raza, S.A., Nizami, A.S., Rehan, M., Al-Waked, R., Korres, N.E., **Waste to energy potential: a case study of Saudi Arabia. Renew. Sustain. Energy Rev.** n. 61, p. 328-340, 2016.

PARLAMENTO EUROPEU. **Gestão de resíduos na UE: factos e números**. Portavoz: Jaume Duch Guillot. p. 1-6, 05 jan, 2022.

PAIVA, Luiz Neto *et al.* Potencial de usinas Waste to Energy no Noroeste brasileiro: projeção e análise comparativa de impactos na esfera ambiental e nos setor energético. **Revista Produção Online**. Florianópolis, SC, v. 18, n. 4, p. 1374-1397, 2018.

PEDROSO, Enio Fernando Höehr. **Destinação e armazenagem de resíduos sólidos em propriedades rurais**. Trabalho de Conclusão (Administração). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PEREIRA, Gustavo Antonio. **Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas**. (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2017.

REIS, Lineu Belico dos; SILVEIRA, Semida. **Energia Elétrica para o desenvolvimento sustentável**. 2 ed. 1 reimp. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

RIGON, Priscila Rejane *et al.* **Coleta urbana de resíduos e sua influência na mobilidade da Cidade de Santa Rosa – RS**. Salão do conhecimento, UNIJUI, p.1-7, 2020.

ROCHA S.D.F; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; ESPÍRITO SANTO, Belinazir Costa. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**. Universidade Federal de Minas Gerais. Eng Sanit Ambient, v.16, n.1, p. 1-10 jan/mar 2011.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 21, 2013.

ROSSI, Catherine, da Rosa. **Potencial de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos na região da AMESC**. (Curso de engenharia elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 04 de dezembro de 2014.

SANTOS, Kenia Gabriela dos *et al.* Fermentação anaeróbica: uma alternativa para a produção de hidrogênio. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 1, p. 1-12, 2012.

SÁ, Lívian R. Vasconcelos de; CAMMAROTA, Magali C; FERREIRA-LEITÃO, Viridiana S. A produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia – aspectos gerais e possibilidades de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros. **Quim. Nova**, Vol. 37, No. 5, p. 857-867, Universidade Federal do Rio de Janeiro, - UFRJ, 2014.

SOBRINHO, Eder C. Silveira. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: possibilidades de receita para cooperativas de eletricidade**. (Curso de Pós-

Graduação, Especialização em Energias Renováveis). Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

STEFANELLO, Camila; MARANGONI, Filipe; ZEFERINO, Cristiane Lionço. A importância das políticas públicas para o fomento da energia solar fotovoltaica no Brasil. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar** – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

SILVA, Juliana Pereira da. **Produção de Energia Elétrica a partir da Gaseificação de Resíduos de Couro**. (Mestrado em engenharia química). Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, 2021.

TURKENBURG, W. C. **Renewable Energy Technologies**. J. Goldemberg (Ed.), World Energy Assessment, p. 219-272. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.

VICENTINI, M. C. **Aplicação do Ciclo Rankine Orgânico alimentado termicamente pela queima da casca do arroz e resíduos de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 388–400, 2020.