

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS BAHIENSE DE ARAÚJO

**GESTÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA A RECUPERAÇÃO
ENERGÉTICA**

BELO HORIZONTE
2025

LUCAS BAHIENSE DE ARAÚJO

**GESTÃO DO RESÍDUO SOLIDO URBANO PARA A RECUPERAÇÃO
ENERGÉTICA**

Monografia de especialização apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Fontes Renováveis - Geração, Operação e Integração.

Orientadora: Wadaed Uturbey da Costa

Coorientador: Victor Flores Mendes

BELO HORIZONTE
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos vinte e quatro dias do mês de setembro de 2024, às 18h, o estudante Lucas Bahiense de Araújo, matrícula 2022688265, defendeu o Trabalho intitulado "Gestão do resíduo sólido urbano para a recuperação energética" tendo obtido a média 87(oitenta e sete) .

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 87 (oitenta e sete)

Orientadora: Profa. Dra. Wadaed Uturbey da Costa

Nota: 87 (oitenta e sete)

Examinador: Prof. Dr. Victor Flores Mendes



Documento assinado eletronicamente por **Wadaed Uturbey da Costa, Professora do Magistério Superior**, em 13/11/2024, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Victor Flores Mendes, Professor do Magistério Superior**, em 14/11/2024, às 12:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3540140 e o código CRC 2E015D93.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus e toda providência divina que me orientou, trouxe a luz, me deu disposição, força, saúde e proteção para que eu pudesse elaborar esse trabalho.

Dedico esse resultado também aos meus queridos e amáveis pais que em todos os momentos de vida me apoiam e incentivam na busca dos meus objetivos, sonhos e nas grandes ambições de vida.

Agradeço também pela paciência, compreensão, aceitação e amor dos meus filhos pois em diversos momentos de lazer de nossas vidas tive que escolher priorizar as atividades da vida acadêmica e estar ausente da companhia deles para cumprir os meus objetivos de formação e que havia determinado para mim mesmo.

Por fim, agradeço essa renomada instituição, todos os professores, orientadores, funcionários do corpo administrativo e toda a estrutura que deu suporte para que esse curso de especialização acontecesse de forma produtiva e da forma mais eficiente possível.

“Todos são capazes de desejar vantagens financeiras, materiais ou espirituais, mas o elemento da fé é o único poder certo pelo qual um desejo pode ser transformado em uma crença, e uma crença na realidade”.

(Napoleon Hill)

RESUMO

A gestão municipal dos resíduos sólidos urbanos (RSU) enfrenta desafios complexos em um cenário dinâmico de constante aumento nas quantidades e tipos de materiais descartados. Isso exige que o poder público esteja alinhado com a iniciativa privada para estabelecer as diretrizes legislativas de atuação para que empresas realizem os investimentos em tecnologias que melhor se adequem as características de resíduos sólidos gerados nas localidades a fim de maximizar os rendimentos operacionais e financeiros. A escolha de uma tecnologia de *Waste to Energy* para a aplicação local e corretamente satisfatória deve estar alinhada as especificidades de cada região e os responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos precisam atuar de forma integrada e coordenada.

O presente estudo, baseado em pesquisa bibliográfica do tema e visitas de campo, mostra o potencial de geração de energia por meio dos resíduos sólidos urbanos mundialmente e no Brasil e discute a dinâmica de gerenciamento dos resíduos entre os atores locais, enfatizando os diversos aspectos que englobam e interferem na aplicação da tecnologia de *Waste-to-Energy* (WtE) para a recuperação energética dos resíduos nos centros urbanos. Coloca-se destaque principalmente na aplicação da tecnologia de tratamento térmico por incineração como forma possível e tecnicamente viável a nível mundial para realizar o tratamento dos resíduos na geração de energia elétrica e calor, com a injeção da energia nas redes de distribuição locais. Com o intuito investigativo de se compreender com maior clareza a aplicação da gestão do RSU a nível municipal, foram realizadas visitas de campo a entidades responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos em Belo Horizonte e apresentados os processos produtivos da cadeia de tratamento local do RSU com suas características. Dessa forma, são identificadas as principais iniciativas desenvolvidas pelas entidades responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos mundialmente e localmente. Entre os principais desafios observados destaca-se a restrita área de abrangência do serviço de coleta seletiva na cidade e a falta de infraestrutura das entidades locais para realizarem as atividades de triagem do material.

Palavras-Chave: Waste-to-Energy; Resíduos Sólidos Urbanos; aproveitamento energético dos resíduos.

ABSTRACT

The municipal management of urban solid waste faces complex challenges in dynamic scenarios of constant increase in the quantities and types of materials discarded in cities. This requires that the public power be aligned with the private sector to establish legislative guidelines for companies to make investments in technologies that best suit the characteristics of solid waste generated and maximize operational and financial returns. The choice of Waste to Energy technology for local and correctly satisfactory application must be aligned with the specificities of each region and those responsible for waste management need to act in an integrated and coordinated manner. The present study seeks to demonstrate the growth of waste generation worldwide and locally in Brazil, discussing the dynamics of waste management among local actors to emphasize the various aspects that encompass and interfere in the application of Waste-to-Energy (WtE) technology for the energy recovery of waste in urban centers. Emphasis is placed mainly on the application of heat treatment technology by incineration as a possible and technically feasible way worldwide to carry out the treatment of waste in the generation of energy and heat with injections into local networks. With the investigative purpose of understanding more clearly the application of MSW management at the municipal level, a field visit was carried out in some entities responsible for waste management in Belo Horizonte and the production processes of the MSW treatment chain with their characteristics were presented. In this way, the main initiatives developed by the entities responsible for waste management worldwide and in Brazil are identified, exposing the challenges encountered both for the energy recovery of urban solid waste and to generate the lowest possible environmental impact in the application of WtE technologies.

Keywords: Waste-to-Energy ; Urban Solid Waste; energy potential of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção de geração de resíduos por região	16
Figura 2: Modelo hierárquico da gestão do RSU	17
Figura 3: Correlação entre variáveis nas taxas de combustão do RSU	20
Figura 4: Cadeia produtiva mediante estratégia de circularidade	21
Figura 5: Tipos de tecnologia Waste to Energy	25
Figura 6: Unidade de Recuperação Energética WtE	35
Figura 7: Usina de Recuperação Energética de WtE - URE	37
Figura 8: Esquema da geração de energia de sistemas alternativos	41
Figura 9: Custos de capital x capacidade de tratamentos de RSU	48
Figura 10: Marcos regulatórios do tratamento do RSU	53
Figura 11: Frequência de coleta domiciliar porta a porta em áreas de urbanização	63
Figura 12: Caminhões de coleta do RSU em Belo Horizonte	64
Figura 13: Prensa dos materiais recicláveis da cooperativa	65
Figura 14: Fardos e bags de recicláveis	66
Figura 15: Containers de material reciclável	66
Figura 16: Fluxo de processo do reciclável na cooperativa	68
Figura 17: Separação de recicláveis na cooperativa de BH	68
Figura 18: Área interna do galpão	69
Figura 19: Esteira de triagem de recicláveis	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Poder Calorífico dos materiais	19
Tabela 2: Vantagens e desvantagens da tecnologia de Incineração	40
Tabela 3: Vantagens e desvantagens do processo de Pirólise	42
Tabela 4: Vantagens e desvantagens da tecnologia de Gaseificação	43
Tabela 5: Custos de tratamento de RSU	45
Tabela 6: Custos associados a usinas térmicas de WtE.....	46
Tabela 7: Comparativo de destinação dos resíduos para diferentes tecnologias.....	47
Tabela 8: Custo de investimento x custo operacional de recuperação de energia.....	47
Tabela 9: Geração de Resíduos Sólidos Urbanos nas regiões brasileiras.....	49
Tabela 10: Lista dos atores locais entrevistados.....	59
Tabela 11: Dados da geração de resíduos em BH/MG.....	60
Tabela 12: Composição Gravimétrica do RSU de BH.....	61
Tabela 13: Composição Gravimétrica e PIB das capitais.....	61
Tabela 14: Análise percentual estatística de recicláveis.....	62
Tabela 15: Comparação com estudos anteriores de composição dos resíduos em BH.....	62
Tabela 16: Dados médios de produção da cooperativa	67

LISTA DE SIGLAS

AD	-	Digestão Anaeróbia
EfW	-	Energy From Waste
GWh	-	GigaWatt-hora
MWh	-	MegaWatt-hora
PPP	-	Parceria Público Privada
RSU	-	Resíduo Sólido Urbano
SLU	-	Superintendência de Limpeza Urbana
TWh	-	TeraWatt-hora
WtE	-	Waste to Energy
URE	-	Unidade de Recuperação Energética
SRF	-	<i>Solid Recovered Fuel</i> (Combustível Derivado de Resíduo)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Resíduo Solido Urbano	13
1.1.1 Geração de RSU no cenário global	14
1.1.2 O Poder Calorífico dos materiais	17
1.1.3 Economia Circular.....	20
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivos Gerais.....	22
1.2.2 Objetivos Específicos.....	22
1.3 Estrutura do trabalho.....	22
2. CARACTERIZAÇÃO DO WASTE-TO-ENERGY - WtE	23
2.1 Destinação do RSU e tecnologias de WtE	27
2.1.1 Lixão	27
2.1.2 Aterro Sanitário.....	28
2.1.3 Reciclagem.....	30
2.1.4 Digestão Anaeróbia	31
2.1.5 Unidade de Recuperação Energética – Usina de incineração	32
2.2 Tecnologias alternativas de WtE	40
2.2.1 Pirólise.....	41
2.2.2 Gaseificação	42
2.2.3 Gaseificação por Plasma	43
2.3 Cadeia de Suprimentos e Custos do WtE.....	44
3. A GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL E ASPECTOS REGULATÓRIOS	48
3.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil.....	50
3.2 O Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	54
3.3 O Plano Estadual de Resíduo Sólido	54
3.4 O Plano Municipal de Gestão integrada do Resíduo Sólido.....	55
3.5 O Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos	55
3.6 Waste to Energy no Brasil	56
4. GERENCIAMENTO DO RSU EM BELO HORIZONTE - MG	59
4.1 Agentes locais da gestão do RSU	59
4.2 Dados do RSU de Belo Horizonte	60
4.3 Dinâmicas do processo de reciclagem na cidade.....	62
4.4 Análise situacional e principais desafios	72
5. CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

De acordo com estudo do Banco Mundial (2018), a expectativa é que no ano de 2050 ocorra um aumento na geração de resíduos em 70% em relação aos dias atuais, alterando o patamar anual de 2,01 bilhões de toneladas em 2016 para 3,40 bilhões de toneladas. Desse total, estima-se que 33% não seja tratado de forma ambientalmente segura. Mundialmente a média de geração de resíduos diária varia entre 0,11 kg/pessoa e 0,74kg/pessoa, chegando a extremos de 4,54kg/pessoa (World Bank, 2018). As maiores taxas de geração diária em 2016 estão concentradas nos países da América do Norte, Europa, Ásia Central e América Latina e Caribe, com 2,21 kg/capita/dia, 1,18 kg/capita/dia e 0,99kg/capita/dia respectivamente enquanto a região com menor índice de geração é a África Subsaariana com 0,46kg/capita/dia. Dos resíduos gerados no cenário mundial, temos que 44% se enquadram como matéria orgânica enquanto 38% são materiais recicláveis (plásticos, papéis, papelão, metal e vidro) (World Bank, 2018).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), a geração de energia elétrica por meio da utilização de resíduos ainda tem pouca representatividade na matriz elétrica mundial, representando apenas 0,4%, e maiores esforços devem ser feitos para o desenvolvimento de um modelo produtivo mais sustentável com alternativas para a melhor destinação do lixo residual não reciclável. Os resíduos de baixa qualidade são rejeitados pela indústria de reciclagem por não haver viabilidade técnica, econômica ou ambiental na sua recuperação. Pela cooperação dos diversos atores de toda a cadeia de suprimentos, o setor do *Waste-to-Energy* (WtE) tende a contribuir de maneira preventiva para que os rejeitos sejam melhor recuperados energeticamente com a geração de subprodutos associados e que uma quantidade menor de materiais seja destinada para os aterros sanitários.

A gestão deficiente dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tende a afetar a população mais vulnerável e o meio ambiente pela aplicação de métodos inadequados de condicionamento e de tratamento dos resíduos depositados nos espaços urbanos. Os impactos podem ser ainda maiores, como aponta o estudo do Banco Mundial sobre as emissões globais de gases de efeito estufa projetadas para 2050, que deverão alcançar índices de 2,6 bilhões de toneladas de CO₂ em comparação à quantidade produzida em 2016 e de 1,6 bilhões de toneladas de dióxido de carbono caso não ocorram melhorias significativas

na gestão dos materiais. É importante ressaltar que cerca de 70% do resíduo sólido urbano é destinado aos aterros sanitários ou lixões municipais a céu aberto, que são grandes responsáveis pela geração de gases de efeito estufa, e a aplicação de tecnologias do WtE contribui efetivamente para a mitigação dos riscos associados a essas emissões (ISWA, 2022). A gestão inadequada dos resíduos tem contaminado os oceanos entupindo redes de esgoto nos centros urbanos, causando enchentes com transmissão de doenças, tem aumentado os problemas respiratórios, envenenando os animais e afetando o desenvolvimento econômico com a redução da atividade turística de inúmeras localidades (World Bank, 2018). A emissão de gases de efeito estufa, que ocorre como resultado da inadequada prática de coleta, aterramento inadequado e queima de resíduos ao ar livre tem, na eliminação do gás metano, um dos elementos que mais geram impactos nas condições atmosféricas contribuindo negativamente na cadeia do gerenciamento de resíduos sólidos.

1.1 Resíduo Sólido Urbano

Para efeitos de classificação dos resíduos sólidos, o Art 13º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, define que os resíduos sólidos urbanos são o conjunto dos resíduos domiciliares originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana que são originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT define como aqueles resíduos em estado sólido ou semissólido resultante das atividades industriais, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, os líquidos impróprios de serem despejados nos cursos d'água ou na rede pública de esgoto. Esses resíduos podem ser classificados ainda em dois grupos específicos sendo os Perigosos (classe I) e os Não Perigosos (classe II) (Viegas, 2022).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) representam uma das categorias de tipos de resíduos existentes e que precisam ser gerenciados a nível local. Outras categorias incluem os (a) resíduos industriais, (b) resíduos agrícolas, (c) resíduos da construção civil, (d) resíduos perigoso, (e) resíduos hospitalares, e (f) resíduos eletrônicos. O RSU devidamente tratado tem potencial para se tornar matéria prima na transformação de novos subprodutos e o seu reaproveitamento é parte ativa no contexto da Economia Circular. Ele está associado

ao processo de tratamento capaz de gerar energia elétrica e calor quando corretamente aproveitado.

O gerenciamento dos resíduos sólidos é parte fundamental nas políticas e planos de desenvolvimento da sustentabilidade envolvendo a saúde de forma ampla na sociedade. Atualmente em países em desenvolvimento, a gestão do RSU pode representar cerca de 20% dos orçamentos municipais sendo que 90% dos materiais recolhidos ainda são destinados a lixões abertos ou para a queima indevida impactando a saúde e a limpeza de regiões que crescem em ritmo acelerado.

1.1.1 Geração de RSU no cenário global

A rápida urbanização estimula a procura por espaços de moradia e de lazer tornando ainda mais escassa as áreas de tratamento e gerenciamento dos resíduos sólidos próximos aos grandes centros urbanos. Os níveis de desenvolvimento econômico dos países refletem diretamente nas quantidades e tipos de resíduos gerados pela população e isso desencadeia diferentes estratégias para o gerenciamento dos resíduos sólidos. Dados de 2019 apontam que a nível global foram gerados cerca de 2.700 milhões de toneladas de RSU e a expectativa é que esse número aumente até o ano de 2030 para aproximadamente 3 bilhões de toneladas de resíduo. Desse total, 79% foram depositados em aterros e lixões, sendo que desse montante somente 27% foram destinados aos aterros sanitários (World Bank, 2018) e os materiais recicláveis representam aproximadamente 11% do montante total gerado. Tal estimativa é sustentada pelo aumento populacional e pelo incremento do PIB dos países, que ocasiona o aumento do consumo em larga escala (ISWA,2022).

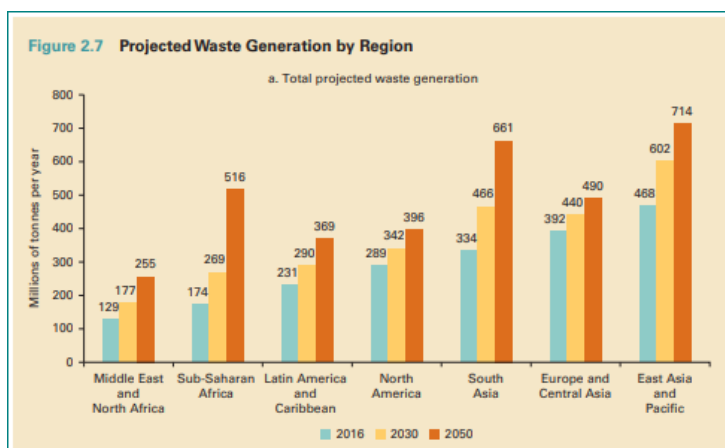
Existem diferenças nas quantidades de geração de resíduos conforme o patamar econômico dos países e o aumento dos níveis de receita de uma nação interfere diretamente nos percentuais de matéria orgânica que compõe o conjunto do RSU. Nações desenvolvidas geram relativamente menos resíduos orgânicos, representando 32% do total, e produzem mais lixos secos que podem ser reciclados como plástico, papel, papelão, metal e vidro surgindo itens como borracha, couro e madeira, que representam 51% do montante gerado. Isso significa que diferentes estratégias de gerenciamento e tratamento dos resíduos devem ser desenvolvidas de forma particular conforme a característica e a composição do volume gerado de cada região. Esse fato demonstra que países com menor grau de desenvolvimento

econômico apresentam conseqüentemente menor capacidade energética devido a presença da água e umidade nos resíduos (ISWA, 2020). Países em desenvolvimento e com receitas menores tem a composição do lixo orgânico e alimentos representando 53% e 56% do total gerado respectivamente. Em países subdesenvolvidos, a representação dos materiais que podem ser reciclados chega somente a 16% (World Bank, 2018).

Reconhece-se que 1,2 bilhões de toneladas de resíduos permanecem após o processo de triagem para reciclagem anualmente no mundo, mas somente 16.6% são tratados com a utilização da tecnologia de *Waste to Energy* sendo que a Agência Internacional de Energias Renováveis estima que o setor de WtE tem a capacidade de gerar 13 GW de eletricidade em escala global (Dadario et al. 2023).

Nos países de economia desenvolvida há recorrência de práticas de tratamento adequado dos resíduos sólidos em aterros sanitários e usinas de WtE, como na Europa (24,7%), Estados Unidos (11,2%) e na Ásia (29,2%) que aplicam a tecnologia térmica de incineração enquanto as nações em desenvolvimento o tratamento de resíduos se concentra em aterros sanitários e baixos índices de reciclagem e compostagem (ISWA, 2013).

Regiões do Leste Asiático e Pacífico tem gerado a maior parte dos resíduos no mundo com 23%, o Oriente Médio e Norte da África com a menor produção de 6%. No entanto, as regiões com maior índice de crescimento são a África Subsaariana, o sul da Ásia, o Oriente Médio e o Norte da África prevendo-se que sejam até triplicadas as quantidades de resíduos como pode ser observado na figura 1. Mesmo tendo um contingente populacional menor, 16% da população mundial, países desenvolvidos geram 34% do total de resíduos mundiais enquanto países subdesenvolvidos somam 9% do total da população mundial e contribuem com 5% do total de resíduos gerados (ZAKA S.; TATA P.B et al, 2018).

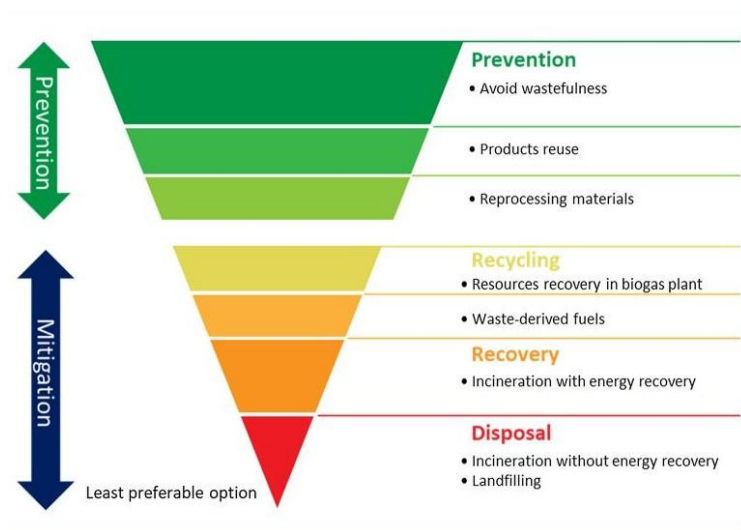
Figura 1: Projeção de geração de resíduos por região

Fonte: World Bank, 2018

Países asiáticos e europeus somam décadas de experiências com a implementação de políticas públicas destinadas a estimular a gestão dos resíduos frente ao crescente volume de geração de resíduos ao longo dos anos impulsionado concomitantemente com os avanços econômicos. Países desenvolvidos têm direcionado significativos esforços na recuperação de matérias com ênfase na reciclagem e no tratamento de orgânicos, utilizando-se de tecnologias de automação para a triagem do material de forma mais eficiente e no gerenciamento de materiais orgânicos por meio da compostagem, digestão anaeróbia e outras tecnologias que permitam a captura do biogás e fertilizantes para o solo (ZAKA S.; TATA P.B et al, 2018).

De modo geral, as políticas públicas dos países da União Europeia quanto ao tratamento dos resíduos, estabelecidas nos trabalhos do Waste Framework Directive (2008), estabelecem que todos os esforços no gerenciamento dos RSU devem estar pautados na definição da hierarquia dos objetivos da gestão, como apresentado na figura 2, em que a ênfase se dá inicialmente na redução do consumo e da geração de resíduos, a reutilização dos materiais, o reprocessamento e reciclagem, a recuperação energética por meio de aplicações de tecnologias de WtE e, pôr fim, a disposição do material não utilizável nos aterros sanitários.

Figura 2: Modelo hierárquico da gestão do RSU



Fonte: Tsui T.H, Wong, J.W.C. A, 2019

O modelo japonês de gestão do RSU envolve iniciativas de redução da produção, a reutilização dos materiais, estímulos a reciclagem com a recuperação de energia, tratamento do resíduo e a destinação final correta do rejeito (ISWA, 2023).

No intuito de orientar as iniciativas de investimentos no setor de WtE, diversificando as formas de tratamento dos resíduos de maneira inteligente e mais sustentável, a hierarquia da gestão dos resíduos tem sido replicada a nível mundial determinando as diretrizes para a atuação de órgãos públicos, para a iniciativa privada e para a sociedade em todas as esferas da administração a nível nacional, estadual e municipal.

1.1.2 O Poder Calorífico dos materiais

O poder calorífico pode ser definido como uma medida termodinâmica que representa a quantidade de calor liberado durante a combustão completa de um mol de uma substância a uma temperatura de 25°C e submetido a pressão de 760mmHg sendo classificado de duas formas, como poder calorífico superior ou poder calorífico inferior (COSTA et al, 2009). O poder calorífico dos materiais é uma grandeza essencial para compreender a energia interna liberada na combustão do material para a produção de calor e energia a ser utilizada nas diferentes tecnologias no tratamento dos resíduos pelo *Waste-to-Energy*.

O conteúdo energético presente no RSU varia conforme as características de consumo dos países de forma que países com maior nível de desenvolvimento econômico tem gerado resíduos com maior poder calorífico. Sustentado pelas práticas de gerenciamento e tratamento dos materiais estes podem aproveitar melhor a possibilidade de recuperação energética e de geração de calor reaproveitado dos materiais.

A Tabela 1 mostra o conteúdo energético de alguns materiais de forma comparativa sendo considerado que 3.600 kJ é o equivalente a 1 kWh de energia (AREMO A.S; GANIYU H, 2019). O poder calorífico encontrado no resíduo sólido dos países em desenvolvimento no estudo aponta para valores aproximados entre 11 e 13 MJ/kg o que representa valores acima do valor mínimo recomendado de 6 e 7 MJ/kg. A China apresenta um conjunto de RSU com baixo valor calorífico variando entre 5 e 6 MJ/kg enquanto nas regiões desenvolvidas economicamente essa taxa chega a 8 a 10 MJ/kg (ISWA, 2023). Nos Estados Unidos e Europa, os valores de poder calorífico dos resíduos variam em média entre 10 MJ/kg e 11,7MJ/Kg. Em países em estágio de desenvolvimento, o RSU apresenta grande quantidade de humidade e material orgânico, o que leva a um baixo poder calorífico do material para ser utilizado em incineradores, exige o índice mínimo de 6 MJ/kg para o combustível, já que a eficiência energética da tecnologia está diretamente ligada à composição do rejeito (UNEP,2019). Aremo e Ganiyu (2019) enfatizam que o RSU que apresenta baixo poder calorífico estando associado ao elevado teor de umidade, necessitará da aplicação de combustível extra para aquecimento e queima em métodos de tratamento como a incineração. Para os países em desenvolvimento, o baixo poder calorífico com mínimo de 7 MJ/kg e alta umidade dos resíduos permanecem como fatores técnicos críticos para o tratamento térmico com WtE. Plantas térmicas modernas em larga escala requerem o abastecimento de no mínimo 100.000 toneladas de resíduos por ano durante o longo período de operação (UNEP, 2019) e as variações na composição do resíduo podem contribuir nos processos de incineração e nos estudos de viabilidade técnico-financeiro de implantação das usinas. Como um dos fatores que orienta a definição da viabilidade técnica das usinas de incineração, o estudo inicial das características dos resíduos locais que não devem apresentar poder calorífico menor que 5 MJ/kg e para índices entre 5 MJ/kg e 6,5MJ/kg o resíduo deve passar por um processo de pré-tratamento para aumentar o seu poder calorífico. Resíduos com valores acima de 6,5MJ/kg, a aplicação da incineração se torna viável.

Santos e Tambani (2019) afirmam que as características físico-químicas da biomassa podem variar significativamente conforme o seu tipo e de acordo com o pré-tratamento

aplicado nos materiais. Desse modo, conhecer as características e as propriedades dos recursos afeta significativamente a escolha dos métodos de controle do processo de combustão e a otimização dos resultados na geração de energia. A Tabela 1 apresenta dados comparativos entre alguns tipos de biomassa demonstrando o potencial energético representado por seus respectivos poderes caloríficos.

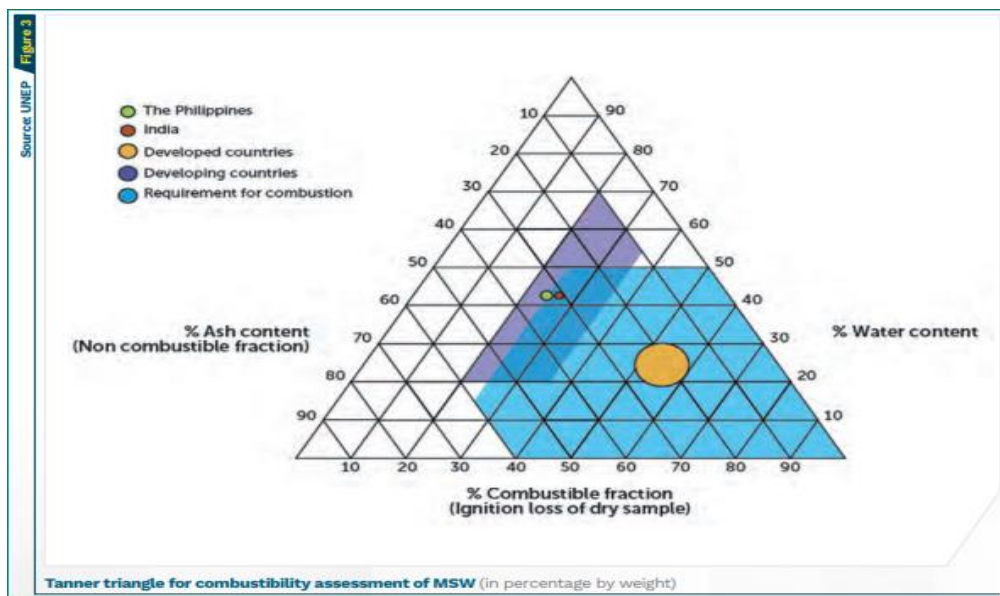
Tabela 1: Poder Calorífico dos materiais

Materiais	Poder Calorífico (MJ/kg)
Plástico	35
Textil	19
Papel	16
Orgânico	4
Metais e vidros	0
Gás Natural	35-50
Diesel	46
Madeira	15
Combustível Derivado de Resíduo (CDR)	13-23
Carvão Black	29-32
Borracha	28
Couro	15
Bambu	18-19
Algodão	17-18
Caroço de Açaí	17-18
Casca de Arroz	16-18
Palha de Coco	18-20
Palha de Milho	17-18
Bagaço de Cana	16-18

Fonte: Galavote, 2022. UNEP, 2019. World Energy Council, 2016. Santos J.; Tambani P., 2019

O triângulo de Tanner, figura 3, correlaciona os percentuais de cinzas do montante de resíduo, de água da fração com o de material combustível para demonstrar que os países desenvolvidos apresentam a composição do RSU com maior poder de combustão e teor calorífico do que os países em desenvolvimento, ou da Índia e das Filipinas. Esses países, conforme já mencionado, apresentam as frações de resíduos com menos conteúdo de água, com maior índice de materiais secos e recicláveis gerando maior quantidade de cinzas como resultado da queima desses materiais.

Figura 3: Correlação entre variáveis nas taxas de combustão do RSU



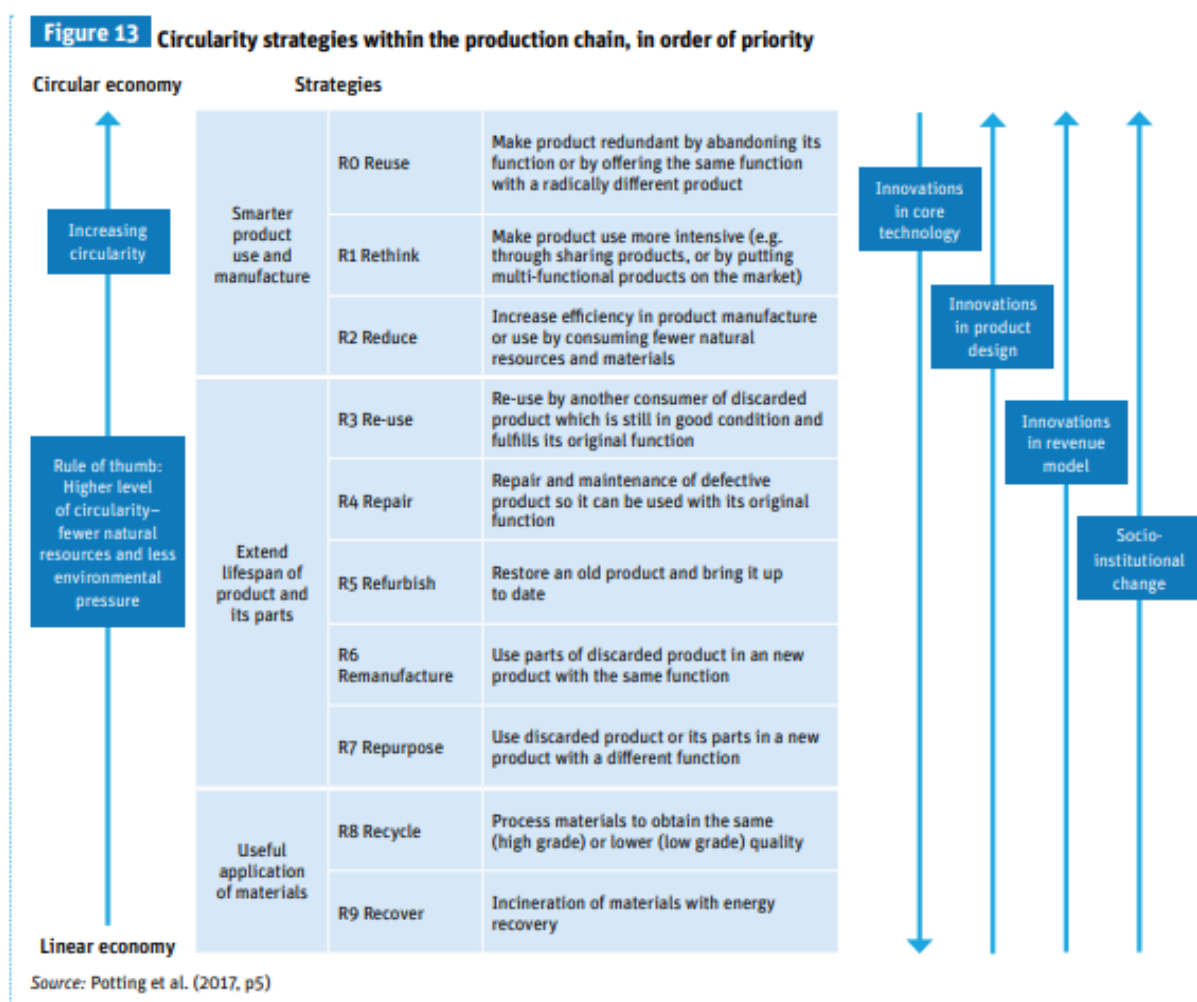
Fonte: ISWA, 2023

1.1.3 Economia Circular

O conceito de Economia Circular perpassa por uma grande variedade de segmentos da economia interagindo com diferentes processos, atores, instituições, agentes públicos e privados de toda a cadeia produtiva influenciando a forma como os processos produtivos de negócios estão organizados. Mediante o cenário de crescente urbanização, modernização, consumo de bens e serviços com severos impactos climáticos o conceito da Economia Circular estimula a racionalização das formas de consumo e produção de maneira sustentável. Ela promove ainda o incentivo de redução da geração de resíduos com remodelagem do design dos produtos voltados a sua reutilização, reciclagem, reparos e recuperação para que possam ser utilizados dentro de novos formatos e como nova matéria prima. A cadeia produtiva que promove a alteração do modelo linear de produção para o conceito baseado na circularidade, propõe que os recursos existentes sejam utilizados de forma inteligente, em menor escala e gerando menos impactos ao meio ambiente. A estratégia de circularidade dos 9 R's apresentado no trabalho do Banco Mundial (2021) enfatiza que deva ser aplicado inovações tecnológicas mais inteligentes e proporcionar novos significados aos produtos com mudanças no design, na funcionalidade afim de alterar modelos de receitas e gerar impactos socioeconômicos na sociedade. A Economia Circular

caracteriza-se pela abordagem de um sistema regenerativo substituindo o conceito linear pelo da restauração, com a utilização de energias renováveis mediante a eliminação de produtos químicos e tóxicos (World Bank Group, 2021). A importância do gerenciamento dos resíduos é considerada na Economia Circular mediante a correta destinação do RSU em cada fase do modelo hierárquico com o intuito de se reduzir grande parte do consumo estimulando a reutilização, reciclagem e reaproveitamento. Indústrias e fábricas devem receber os materiais como matéria prima secundaria incentivando o setor de WtE na recuperação de rejeitos não utilizáveis e impedindo a sua destinação final para os aterros sanitários.

Figura 4: Cadeia produtiva mediante estratégia de circularidade



Fonte: World Bank Group, 2021

Conforme indicado pela Confederação Europeia da Usinas de WtE (CEWEP), o Energy-from-Waste (EfW) ou Waste-to-energy (WtE) promove o essencial tratamento dos resíduos onde a reciclagem não é apropriada e se destina como fonte de matérias primas secundárias de energia renovável para a Economia Circular. Com o desenvolvimento da Economia Circular nos países desenvolvidos, o processo de transição tem ocorrido no sentido de se buscar cada vez mais a aplicação da hierarquia de gerenciamento de resíduos diferentes enfatizando a aplicação de tecnologias de WtE para se destinar somente o rejeito não aproveitável para os aterros sanitários.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Compreender o cenário da geração dos resíduos sólidos urbanos mundialmente e os métodos de gerenciamento aplicados para o desenvolvimento de tecnologias de *Waste-to-Energy* atualmente disponíveis no tratamento dos resíduos e na recuperação energética.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Estudar o cenário internacional sobre a produção de resíduo sólido urbano;
- II. Analisar as referências conceituais e teóricas sobre as tecnologias de WtE e suas aplicações no tratamento dos resíduos na recuperação energética;
- III. Conhecer os atores envolvidos no gerenciamento do RSU em Belo Horizonte/MG;

1.3 Estrutura do trabalho

A pesquisa de monografia consiste no estudo bibliográfico sobre a geração de RSU no mundo e no Brasil e as tecnologias de *Waste to Energy* aplicáveis considerando os elementos essenciais que promovem a viabilidade de sua implantação como aspectos sociais, ambientais, econômicos, estruturais, legislativos e financeiros. A visita em campo foi realizada nas instituições de Belo Horizonte que administram e atuam na gestão das diversas atividades relacionadas aos resíduos sólidos urbanos. No capítulo 1 são apresentadas as características de geração dos RSU no mundo enfatizando elementos como o poder

calorífico dos materiais e a inserção do gerenciamento nas práticas do modelo da Economia Circular. No capítulo 2 são apresentadas as definições do *WtE* e algumas das diferentes tecnologias atualmente disponíveis como o modelo de incineração. No capítulo 3 são estudados os aspectos legislativos do setor no Brasil e, no capítulo 4, é apresentado os estudos realizados na visita técnica nos atores responsáveis pela gestão do resíduo sólido urbano na cidade de Belo Horizonte.

1. CARACTERIZAÇÃO DO WASTE-TO-ENERGY - WtE

Waste to Energy refere-se a uma variedade de tecnologias de tratamento que converte o resíduo em eletricidade, calor e combustível, assim como um conjunto de resíduos incluindo cinzas, lama, escórias, água descartada e emissões incluindo gases de efeito estufa (UNEP, 2019). Todos os métodos de tratamento do resíduo por calor com recuperação de energia são referenciados de maneira geral como *Waste to Energy* e englobam tanto os sistemas de conversão biológica quanto termoquímica (Dadario et al, 2023). Associada a hierarquia de tratamento de resíduo, é uma tecnologia de recuperação energética de materiais que se adequa aos preceitos da Economia Circular em que o gerenciamento integrado e sustentável do resíduo possibilite um panorama analítico útil na estruturação do WtE de forma a integrar os elementos físicos, os stakeholders e as estratégias de desenvolvimento e implantação das tecnologias nas localidades (UNEP 2019). A Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA) define que tanto a terminologia *Waste to Energy* (WtE) quanto a *Energy from Waste* (EfW) são corretamente utilizadas como o processo de aproveitamento energético dos materiais devidamente coletados e separados após passarem por toda a cadeia produtiva hierárquica de manejo do Resíduo Sólido Urbano. No entanto, a denominação *Energy from Waste* (EfW) é preferida por destacar e colocar mais ênfase na proposta de se gerar energia a partir da utilização dos materiais com elevado teor calorífico e a aplicação correta das tecnologias em cada fase do processo. Assim, o termo *Waste-to-Energy* (WtE) ou *Energy-from-Waste* (EfW) é o tratamento térmico dos resíduos que não podem ser reciclados na recuperação da energia desses materiais reduzindo-se a necessidade de destinação para os aterros sanitários (ISWA, 2022). Alguns modelos de negócios

relacionados à tecnologia do WtE incluem as térmicas, as termomecânicas, as termoquímicas e as bioquímicas. A Confederação Europeia de Usinas de *Waste to Energy* define a tecnologia como designada para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos pela incineração sob condições controladas para a geração de energia, garantindo que os ciclos de reciclagem e remanufatura estejam descontaminados. Ela assegura, de forma confiável, o tratamento dos rejeitos de forma ininterrupta ao longo do ano com a entrega de energia na rede das concessionárias de energia local (CEWEP, 2019). A energia recuperada do RSU é o resultado da aplicação de métodos de tratamento e conversão de materiais não recicláveis em calor, eletricidade e combustível por meio de variados processos térmicos e químicos incluindo a incineração, gaseificação, a pirolise, a digestão anaeróbia e a produção do biogás.

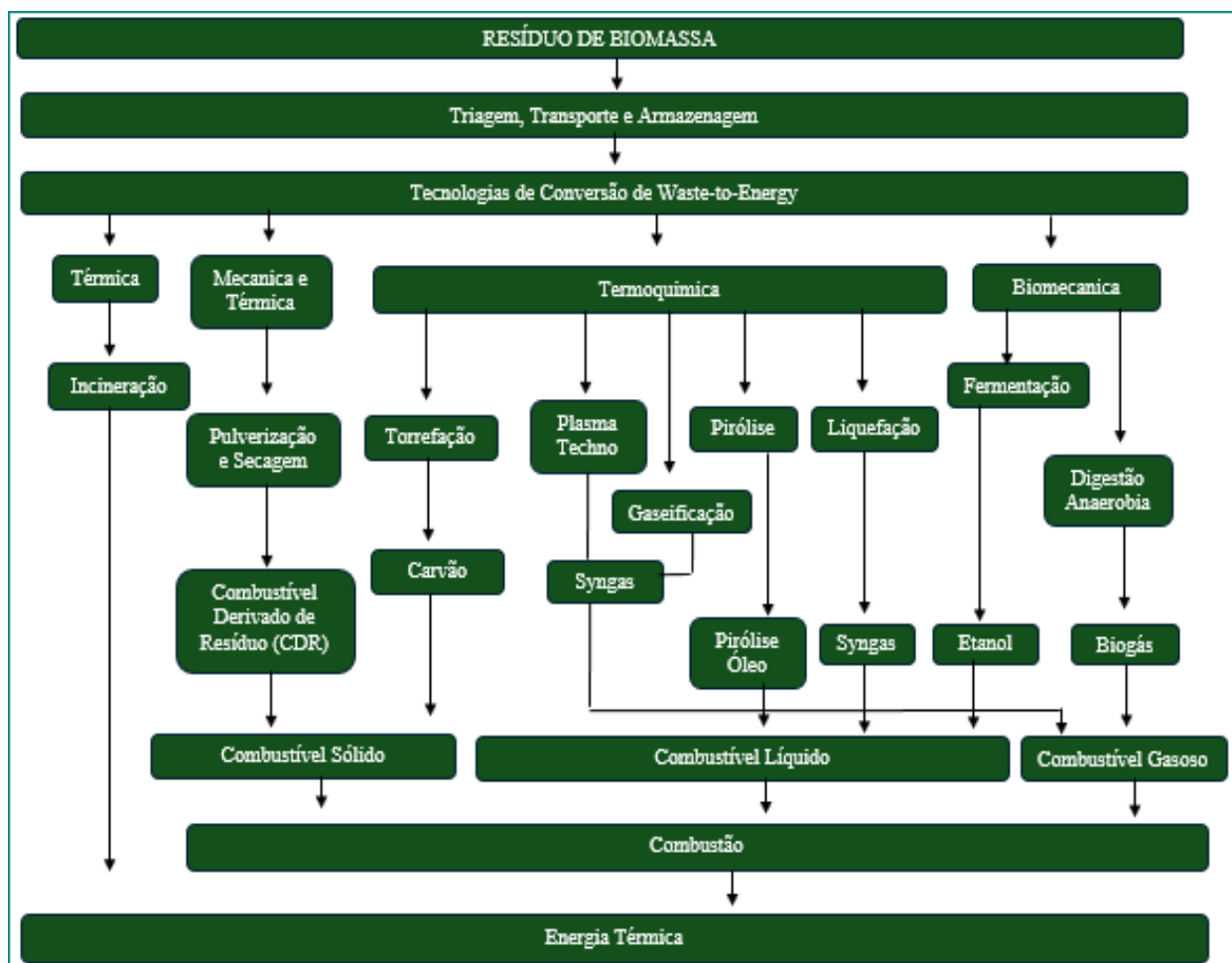
O desenvolvimento de estratégias do WtE está associado a uma matriz multisetorial e interligada que envolve stakeholders e estratégias de saúde, meio ambiente, socioeconômicas, técnicas e jurídicas (UNEP, 2019). Do volume total de resíduos gerados a nível mundial, e que passa por um processo de gerenciamento e controle, a participação do EfW representa 23% de todo o material contabilizado enquanto o material reciclável representa 20% e a compostagem e digestão anaeróbia totalizam 11% do montante global.

Existem diferentes métodos e tipos de tecnologia de WtE a serem aplicados e sua definição é influenciada pela composição do RSU bem como a dimensão das áreas disponíveis, os subprodutos gerados, adequação aos aspectos legislativos, características sociais e ambientais, disponibilidade de recursos financeiros e a estrutura de gerenciamento dos atores locais. Cada uma das tecnologias pode gerar subprodutos diferentes e exigir recursos variados para que os tratamentos dos resíduos possam ocorrer de forma efetiva e eficiente.

Os métodos comparativos de aplicação de determinada tecnologia WtE devem levar em consideração uma ampla avaliação de elementos que compõe a cadeia de valor considerando, (a) experiência e tempo de operação da tecnologia em determinada escala, (b) disponibilidade, (c) confiabilidade, (d) flexibilidade de combustível, (e) equilíbrio entre massa de resíduos e energia, (f) aspectos ambientais, (g) aspectos econômicos, (h) produção de energia para rede. Algumas tecnologias exigem alguns estágios de pré-tratamento dos resíduos (Solid Recovered Fuel – SRF) antes de iniciar os processos de combustão. Pode ser necessário também, a triagem do material com redução de volume mediante a correta granulometria, a definição de componentes químicos e orgânicos aceitáveis para se criar um composto de maior valor calorífico (LCV). Quanto maior for o nível de necessidade de pré-

tratamento e adequação a parâmetros de qualidade estabelecidos maiores são os custos de operação das plantas. Dentre algumas tecnologias de WtE, as usinas de incineração demonstram cumprir a maior parte dos requisitos e são as mais utilizadas mundialmente com grande representatividade na Europa, no Japão, na China e nos Estados Unidos (ISWA, 2013). A figura 5 apresenta as tecnologias e categoriza os tipos de tratamento térmico aplicados ao WtE para a recuperação energética e valorização do resíduo.

Figura 5: Tipos de tecnologia Waste to Energy



Fonte: UNEP, 2019 (traduzido pelo autor)

O tratamento do EfW é processado em aproximadamente 2.450 plantas instaladas e em operação em diferentes partes do mundo que, reunidas, apresentam uma capacidade de processamento de 368 milhões de toneladas por ano, ou seja, uma média estimada de 12.000 toneladas/mês/planta (ADB, 2020). Com objetivos de aumentar a capacidade e o número de plantas de tecnologias de WtE para processar mais de 40 milhões de toneladas por ano de RSU, estima-se que a união europeia irá gerar 18 TWh de energia recuperados em forma de

calor ou eletricidade (Dadario et al, 2023). Países europeus com a maior taxa de reciclagem são aqueles com maiores índices de tratamento do resíduo com WtE e consequentemente reduzem consideravelmente a quantidade de materiais destinados aos aterros. A implementação da tecnologia do EtW deve estar vinculada e ser desenvolvida paralelamente às estratégias e programas de reciclagem ou reutilização dos materiais considerando que mesmo após os processos de pré-tratamento e triagem, ainda se acumulam volumes residuais que podem ser consumidos no WtE. A utilização da tecnologia térmica por incineração nos países com maior nível de desenvolvimento econômico tem apresentado crescimento de 0,1% para 10% estimulados pela adesão da China (World Bank, 2018). Países europeus com forte predominância da tecnologia de incineração são apresentados por Dadario et al (2023) incluindo Suécia, Japão, Suíça, Holanda, Alemanha, Finlândia, Bélgica, Noruega, Dinamarca, Luxemburgo, França, Áustria, Inglaterra e Estônia.

Ainda que exista na Europa uma ênfase de se encorajar a utilização do *Waste to Energy* no processo de tratamento evitando os acúmulos de materiais destinados aos aterros, a Diretiva 2000/76/EC obriga que as plantas de WtE sigam regras restritivas e rígidas quanto aos padrões das emissões de atmosféricas, na coleta dos resíduos, no monitoramento e no devido tratamento dos materiais (Dadario et al, 2023). Pela Diretiva 2008/98/EC, a União Europeia estabelece a hierarquia de prioridades para a destinação dos RSU em que a aplicação do WtE ganha significativa relevância em detrimento dos aterros. O Japão, por exemplo, implementa iniciativas desde a década de 1970 para o desenvolvimento de tecnologias térmicas de WtE com incineradores na recuperação energética promovendo constantes intervenções técnicas e legislativas para tornar as usinas cada vez mais sustentáveis e gerar menos impactos no meio ambiente.

O desenvolvimento de projetos de EfW exige a participação de inúmeros atores locais interessados nas dinâmicas de tratamento dos RSU. O poder público abrangendo as esferas federal, estadual e municipal que estabelecem as diretrizes legais para incentivar os investimentos e determinar as taxas de manejo a serem aplicadas aos usuários. As entidades financeiras com programas de créditos e financiamentos de projetos de alto valor de custo de capital (*capex*) e custo de operação (*opex*), as parcerias públicas privadas na operação e construção das usinas, a sociedade civil organizada, moradores locais, órgãos de fiscalização e controle da preservação do meio ambiente e empresas de distribuição de energia elétrica participam ativamente das questões referentes às implantações de projetos de WtE e na

transformação de subprodutos associados aos processos produtivos para a recuperação energética dos resíduos (ISWA,2023).

É importante salientar que a tecnologia do EfW não irá eliminar totalmente os resíduos dos centros urbanos, que a energia recuperada no tratamento do resíduo exclusivamente não cobre os custos operacionais (*opex*) e somente abastece parte da demanda de energia dos grandes centros urbanos próximos e que os custos de implantação das usinas são mais elevados dos que os investimentos aplicados nas construções de aterros sanitário e lixões a céu aberto. Esses prós e contras das tecnologias podem ser revertidos conforme os contextos locais envolvendo a disponibilidade de áreas para a instalação, custos de transporte e logística dos materiais e taxas ambientais aplicáveis sobre as licenças para operação (ISWA,2023). Assim, as tecnologias e os processos aplicados no tratamento dos resíduos para o WtE são componentes importantes da economia circular e se apresentam como metodologias eficientes para se recuperar o potencial de energia residual existente nos materiais e reduzir o volume de RSU destinado aos aterros sanitários. Para uma avaliação propicia da melhor tecnologia de tratamento de WtE a ser empregado, se faz necessário realizar um estudo quantificado e abrangente do completo sistema de pré-tratamento dos resíduos, das características dos materiais coletados, dos materiais de input, da tecnologia, da conversão de energia e de todo o subproduto produzido no final da cadeia (ISWA,2013).

2.1 Destinação do RSU e tecnologias de WtE

2.1.1 Lixão

Historicamente, os primeiros resíduos coletados foram transportados para áreas abertas onde as pessoas tinham acesso para realizar a coleta daqueles itens que tinham algum valor de mercado. Ainda hoje, os lixões a céu aberto recebem cerca de 40% do RSU. Nos países pobres e em desenvolvimento, essas áreas ainda são amplamente utilizadas para o depósito dos resíduos sólidos urbanos a céu aberto causando sérios danos ao meio ambiente incluindo a poluição dos solos, do ar e da água além de trazer doenças e transtorno social para as localidades do entorno. Esses locais estão sendo erradicados como método de deposição de resíduos pelos inúmeros prejuízos que causam ao planeta em larga escala e sendo substituídos pelos tratamentos térmicos associados aos aterros sanitários. Como relatado pelo ISWA Closing Dumpsites de 2016, cerca de 1 milhão de mortes por ano estão

relacionadas as precárias condições de depósitos do lixo em áreas abertas sendo que 64 milhões de pessoas tem a saúde afetada pelos 50 maiores lixões mundiais. Estas áreas geralmente são grandes responsáveis pela contaminação das águas nos lençóis freáticos e de superfície, do solo e emitem grande quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera sendo os principais os gases metano, ácidos, partículas de carbono e toxinas (ISWA, 2023). No Brasil, o material orgânico representa 51,4% da composição gravimétrica do RSU coletado totalizando mais de 28 milhões de toneladas por ano podendo ser considerado como um grande gerador de impactos ambientais pela emissão de chorume e gases de efeito estufa produzidos tanto em lixões quanto em aterros (GALAVOTE, 2022).

No lixão não existe nenhum controle sobre os tipos de resíduos depositados e quanto ao local de disposição deles. Nesses casos, resíduos domiciliares e comerciais de baixa periculosidade são depositados juntamente com os industriais e hospitalares, de alto poder poluidor. Outros problemas sociais relacionados são a presença de animais nos locais, a presença de catadores sem equipamentos adequados, riscos de incêndios causados pelos gases gerados pela decomposição dos resíduos e de escorregamento, quando da formação de pilhas muito íngremes sem critérios técnicos (VIEGAS, 2022).

2.1.2 Aterro Sanitário

Pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8419/1992, um aterro sanitário pode ser definido como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, a fim de minimizar os impactos ambientais por meio de princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho (VIEGAS, 2022).

Os aterros sanitários são as primeiras iniciativas de se melhorar o gerenciamento dos resíduos sólidos e promover a erradicação dos lixões. São as áreas mais utilizadas ao redor do mundo para a destinação do RSU como método de gerenciamento dos materiais e exige vastas porções de terras próximas as áreas residenciais para a deposição dos resíduos coletados nos centros urbanos e para minimizar os custos associados ao transporte dos materiais. Estima-se que um aterro sanitário com capacidade de recebimento de 200 mil toneladas/ano de RSU durante 15 anos, ocupe uma área entre 30 e 50 hectares enquanto uma

planta de EfW demandaria um espaço de 4 a 6 hectares aproximadamente (ISWA, 2023). Rejeitos em decomposição em aterros geram o gás Metano, substância que lançada na atmosfera contribui com o efeito estufa e é 28 vezes mais poluente que o CO₂ (WtE SUSTAINABILITY ROADMAP, 2019).

Conforme estudos apontados por Galavote (2002) os aterros sem tratamento são considerados as piores alternativas para o destino dos resíduos já que contribuem para os gases de efeito estufa pela emissão de poluentes. Em acréscimo, ainda exigem grandes áreas de aterramento que possibilitam grande contaminação do solo e da água. É considerado uma alternativa para cenários de transição em que se pretende realizar o fechamento dos aterros controlados e lixões para a instalação de aterros sanitários que apresentam menores custos de operação. Em países em desenvolvimento os aterros sanitários ainda são os destinos preferenciais para a destinação dos resíduos por ter um custo menor e onde ocorre a coleta do Biogás, que é composto de metano, dióxido de carbono e outros componentes. O gás metano, que tem potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do CO₂ se emitido na atmosfera, após passar pelo processo de purificação tem um elevado valor estimado como recurso semelhante ao gás natural. A produção estimada de energia entre os anos de 2016 e 2036 pode chegar em 8,7 GWh, ou 36,25 MWh por mês e atender uma população estimada de 300.000 habitantes na cidade de São Paulo. (Galavote et al, 2022). A produção de energia acontece de forma mais econômica por aproximadamente 3.000 USD/kW e potencial de geração de 1,8 GWh/ano.

Além do tratamento do biogás coletado pela infraestrutura tubular instaladas nos aterros sanitários com possibilidade de gerar energia elétrica, essas áreas também realizam o tratamento do chorume que é eliminado pelo material orgânico em decomposição. Coletar e tratar o chorume associado ao gás metano emitido pela decomposição do material orgânico no aterro realizando a queima do gás é a maneira mais eficiente de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa e converter o metano em CO₂. A recuperação energética promovida por este tratamento possibilita a geração de energia renovável injetada na rede elétrica local acima de 150 kWh por tonelada de resíduo (ISWA,2023). Estudos demonstram que a eficiência de coleta dos gases nos aterros sanitários varia entre 20% e 90% influenciados também pela composição dos resíduos aterrados, umidade e índices de chuvas no local que definem a conversão do material em gás para possibilitar a geração de energia. Locais onde as condições umidade são maiores, apresentam índices de geração de metano superiores às regiões mais secas (Galavote et al, 2022).

Sistemas de tecnologias de recuperação energética em aterros sanitários envolvem os sistemas de coleta, controle da humidade e de conversão de energia que interferem na eficiência de operação. Fatores esses que são influenciados por características estruturais que podem gerar vazamentos e perdas no sistema, ressaltando aspectos quanto ao tipo de cobertura, rupturas em tubulações, regimes de chuvas, pressão barométrica, temperatura do ambiente, velocidade do vento e humidade.

Quanto a geração de energia, estudos apresentados por Galavote (2022) apontam que a relação entre a quantidade de resíduos e a geração de energia é de 0,1 a 0,2 MWh por tonelada métrica de resíduo sendo que no Brasil, a planta de Bandeirantes e Recreio apresenta a produção de 0,07 MWh de energia por tonelada métrica enquanto um aterro sanitário na Itália registrou a geração de 0,06 MWh por tonelada métrica de resíduo.

Em 2007 a União Europeia se comprometeu a reduzir a emissão de gases de efeito estufa até o ano de 2020 e com isso, a capacidade de produção de biogás dobrou entre os anos de 2005 e 2015 saindo de patamares de 2MW para 8MW de potência enquanto a geração de energia saltou de 12,5 TWh para 46,4 TWh.

2.1.3 Reciclagem

Estratégias de reciclagem devem garantir que exista um mercado comprador ou intermediário para viabilizar a comercialização. Materiais como o plástico, metal, papel, papelão e vidro e seus subtipos são triados e devem ser recolocados no mercado para gerarem receitas e cumprirem a importante etapa da economia circular por meio da logística reversa. A reciclagem é um mercado de commodity que flutua conforme a lei de oferta e demanda. Para a reciclagem ser economicamente viável, precisa haver materiais de qualidade que sejam aceitáveis e possam competir com os materiais virgens (CEWEP, 2019). É necessário que haja garantias que os elementos tóxicos sejam removidos para o melhor reaproveitamento dos produtos e a forma mais eficiente é a destinação correta dos resíduos em áreas específicas de coleta e triagem. Após o processo de coleta, estes materiais seguem para espaços onde são realizados os processos de identificação, triagem, fardagem e o registro do peso de cada produto que será revendido para as empresas compradoras de recicláveis. O sucesso da reciclagem recai significativamente na eficiência do processo de coleta e triagem (CEWEP, 2019).

O engajamento social no processo é extremamente relevante e a adoção de soluções integradas é fundamental para se estabelecer uma nova consciência cultural no tratamento do resíduo e alcançar a compreensão e aprovação popular nas estratégias de longo prazo.

Waste to Energy e a reciclagem são métodos complementares de tratamento na gestão do RSU em que os resíduos devem ser triados antes de sua comercialização e, o material rejeitado inutilizável na reciclagem, pode ser destinado às usinas de combustão para a geração de energia (CEWEP,2019).

2.1.4 Digestão Anaeróbia

Considerada a tecnologia mais viável sob o aspecto de mitigar os impactos ambientais e não contribuir para o aquecimento global, a Digestão Anaeróbia (AD) não gera mau odores e pode performar em projetos de pequena escala utilizando uma área restrita (Galavote, 2022). A tecnologia promissora, é utilizada para tratar frações orgânicas dos resíduos sólidos urbanos ou resíduos biológicos de modo a gerar diferentes componentes de valor agregado como o biogás, biocombustível e biofertilizante com menor custo e menores impactos ambientais (Galavote et al, 2022).

A quantidade de usinas de Digestão Anaeróbia no Brasil é maior do que a divulgada pela ANEEL já que muitas utilizam o biogás com objetivos diversos além da produção de energia sendo que somente em 2015, foram registrados 159 biodigestores em áreas rurais. Digestores anaeróbios realizam a recuperação do biogás mediante processos de tratamento e purificação dos gases que precedem a geração de eletricidade. Em 2019, estudos de Galavote (2022) concluíram que os digestores anaeróbios apresentam um custo de capacidade instalada de potência de 4.200 USD/kW tendo a estimativa de produção de 1,80 GWh/ano de energia emitindo menos CO₂/tonelada de RSU se comparado aos índices de emissão do aterro sanitário. A tecnologia pode ser uma alternativa economicamente viável quando são reaproveitados os subprodutos como os fertilizantes e a produção de energia como elementos para a geração de receita.

A Digestão Anaeróbia do resíduo biológico produz biofertilizantes e biogás de alta qualidade a um custo mais reduzidos se comparados aos fertilizantes minerais. Geralmente 10kg de resíduo biológico com umidade produz 1m³ de biogás com a geração de 6 kWh de eletricidade. A nível nacional, considerando 35% de eficiência de conversão anaeróbia, a

potência estimada de eletricidade no Brasil é de 6,9 TWh, representando 1.5% do consumo total de energia no país (Galavote et al, 2022). O potencial de produção energética gira em torno de 0,3MWh por tonelada de resíduo tratado.

2.1.5 Unidade de Recuperação Energética – Usina de incineração

O mundo hoje possui mais de 1.700 plantas térmicas de WtE sendo que 80% estão instaladas em países desenvolvidos liderados pelo Japão, França, Alemanha e Estados Unidos. Mais de 200 usinas térmicas de WtE estão em fase final de construção com previsão de início das operações entre os anos de 2020 e 2023 com unidades emergindo na China, em países em desenvolvimento na Ásia e Pacífico, na Tailândia, Filipinas, Indonésia e Myanmar (UNEP, 2019). De acordo com dados da ISWA (2023) a região asiática lidera o ranking do número de plantas de WtE instaladas com 1.120 usinas, seguido pela Europa com 589, a América do Norte com 11, a América Latina e Caribe com 3 e a África com uma unidade em operação.

A tecnologia é utilizada principalmente pelas nações mais desenvolvidas, por apresentarem alta capacidade de operação, maior receita e disponibilidade financeira para investimentos e indisponibilidade de grandes extensões de terra próximo aos grandes centros urbanos (World Bank, 2018). Dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas confirmam a predominância da utilização da tecnologia por apresentar o melhor método de custo-benefício efetivo no tratamento dos resíduos sólidos urbanos (Dadario et al, 2023).

Esses sistemas térmicos capturam uma porção da energia embutida no resíduo transformando-a em calor e/ou eletricidade (UNEP,2019) e sua aplicação deve ser considerada após os esforços de prevenção, reutilização e reciclagem dos materiais, que são as diretrizes definidas na metodologia do modelo hierárquico do gerenciamento de resíduos sólidos.

Uma planta de recuperação energética é definida por ter o objetivo de recuperar a energia por meio do calor gerado pela queima de resíduos (Dadario et al, 2023) e o material tratado na usina é incinerado sob condições controladas reduzindo o seu volume em 90% (CEWEP, 2019). Além de reduzir o volume dos resíduos de forma significativa sem a necessidade de um pré-tratamento, a incineração nas grandes usinas pode gerar cerca de 500 kWh por tonelada de rejeito (Galavote et al, 2022) e gera benefícios já comprovados incluindo a possibilidade de ser instalada em uma área reduzida, reduz a destinação do

grande volume de resíduos para os aterros sanitários e promove a preservação da utilização do solo para motivos mais nobres. Caracteriza-se também por ser um sistema de produção silencioso que não emite odores fétidos favorecendo a instalação em áreas limítrofes, o que garante a redução dos custos logísticos. Promove também a substituição de combustíveis fósseis na geração de calor e energia reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera e auxilia na prevenção do aquecimento global (Galavote et al, 2022). Uma planta de *Waste to Energy* é capaz de recuperar recursos materiais e caloríficos valiosos mantendo-os fora dos aterros sanitários de modo a promover a recuperação energética sustentável, local, com baixa emissão de carbono, de forma eficiente e reduzindo a dependência da importação de combustíveis fósseis e aumento da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Os resíduos originados pela queima do material nas grades de combustão podem chegar a quantidades de 150 a 250kg por tonelada de rejeito tratado, e as cinzas removidas no sistema de tratamento dos gases são geralmente destinadas para aterros de rejeitos perigosos.

Representando 90% da tecnologia comercialmente utilizada no mundo no WtE, o processo térmico de combustão é feito com a utilização de oxigênio gerando gases como CO₂, O₂, N₂, vapor de água e calor. Globalmente, são considerados líderes como fontes geradoras de substâncias poluentes, pois trabalhando a cerca de 850 °C, dioxinas e furanos podem vir a ser emitidos na atmosfera gerando graves danos à saúde. O processo termoquímico de oxidação dos RSU em fornalhas atinge temperaturas entre 750 °C a 1.100 °C na presença de oxigênio de forma excessiva (Dadario et al, 2023) e nesse processo, o oxigênio reage com os comburentes presentes nos materiais como carbono, oxigênio e enxofre convertendo energia química em calor.

Sistemas de controle de emissão e regulamentações de padrões internacionais devem ser frequentemente monitorados nas plantas para garantir a segurança de operação (ISWA, 2023). Regulamentações restritivas sobre os níveis de emissões de gases e de operação tornam o processo de tratamento do resíduo seguro e ambientalmente limpo. Entretanto, estudos europeus demonstram que os impactos causados pelo WtE são mínimos e insignificantes e que não há evidências de fatores de riscos de câncer associados ou efeitos negativos na capacidade reprodutiva ou no desenvolvimento humanos das regiões de implantação das usinas com a emissão dos gases na atmosfera (Utilitalia, 2020). A operação em estreitas faixas de permissão é determinada por entidades governamentais que limitam e controlam a emissão de gases a quantidades específicas e restringem cada vez mais a emissão de água no meio ambiente durante os processos de produção.

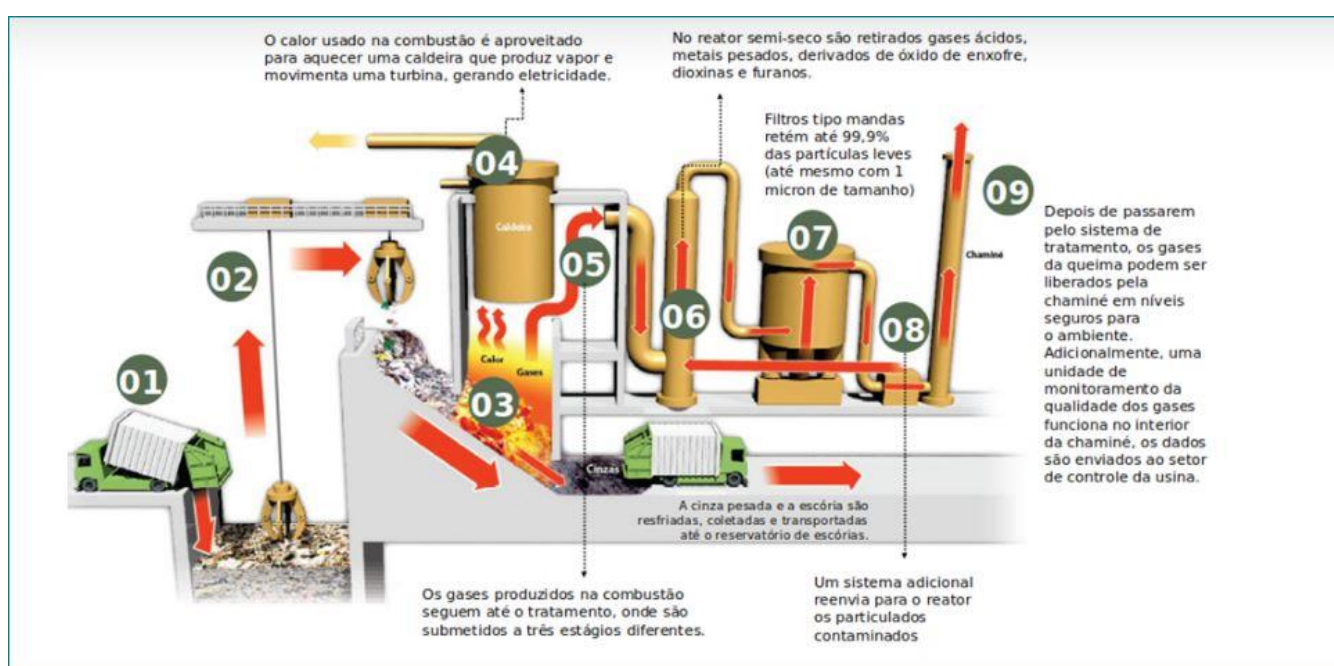
Atualmente, as plantas de WtE dos 28 países da união Europeia combinam a geração de energia elétrica e calor (CHP) produzindo eletricidade suficiente para suprir quase 18 milhões de pessoas por ano e produzindo calor para redes de usinas térmicas que alimentam os centros urbanos totalizando cerca de 15 milhões de pessoas atendidas. Assim, as plantas de WtE podem prover a rede de distribuição local com uma fonte de energia complementar às fontes renováveis intermitentes como solar e eólica (CEWEP, 2019).

A estrutura de uma planta térmica de WtE é desenhada de modo que o resíduo seja depositado no bunker e transportado por grandes guindastes para uma área de moega onde são direcionados para as grelhas da fornalha de queima em alta temperatura. O teor de umidade dos resíduos dispostos nos bunkers de incineração é fator crítico na composição do RSU para o melhor aproveitamento na combustão e na geração de calor e eletricidade. O calor da queima aquece o boiler na geração de vapor, que alimentará as turbinas de geração de energia para a rede, e o processo de limpeza dos gases possibilita que sejam eliminados de forma segura na atmosfera (Dadario et al 2023). A queima ocorre na forma como são depositados os RSU nas grades e há vantagens de eficiência no processo pelo tamanho dos queimadores e baixa necessidade de tratamento prévio dos resíduos. Plantas que recebem materiais com elevada concentração de água, e que geram chorume, precisam ter nos bunkers áreas de recebimento dos resíduos, estruturas de drenagem para recolhimento do líquido antes de entrar nas moegas de encaminhamento para as grades de combustão das fornalhas (ISWA, 2013). Para resíduos com volumes maiores, também se faz necessário um trabalho de redução volumétrica dos itens para não obstruírem a passagem de recolhimento das cinzas. Todo o processo tende a eliminar a possibilidade de contato tanto por humanos ou animais com os resíduos os sólidos (ISWA, 2023).

Uma Unidade de Recuperação Energética – URE, demonstrado nas figuras 6 e 7, pode ser seccionada nas seguintes áreas de produção: (I) Os bunkers, área de entrega e estocagem dos resíduos por meio de caminhões de coleta ou por veículos de grande extensão que realizam o recolhimento do material de forma agrupada nas áreas de transbordo e onde existem grandes guindastes com gigantescas pinças que coletam e suspendem o resíduo sólido urbano não triado para as fornalhas de combustão, (II) Área de combustão em que os materiais são depositados na moega para secagem nas grelhas e queima em que a cinza gerada é recolhida e transformada como subproduto da combustão, (III) área de recuperação energética em que o calor gerado na combustão do RSU na caldeira na produção do vapor pode ser exportado para as indústrias locais ou para a geração de energia elétrica com a

utilização de uma turbina e gerador, (IV) a seção de limpeza dos gases que implica na injeção de diversos reagentes com o objetivo de neutralizar a formação dos ácidos gerados durante a combustão, capturando os resíduos com a utilização de filtros de retenção das partículas que serão futuramente depositadas em aterros de materiais perigosos. Os resíduos filtrados em decorrência do processo de limpeza dos gases gerados representam aproximadamente 3% do total de material recebido na incineração (World Bank, 2018).

Figura 6: Unidade de Recuperação Energética WtE



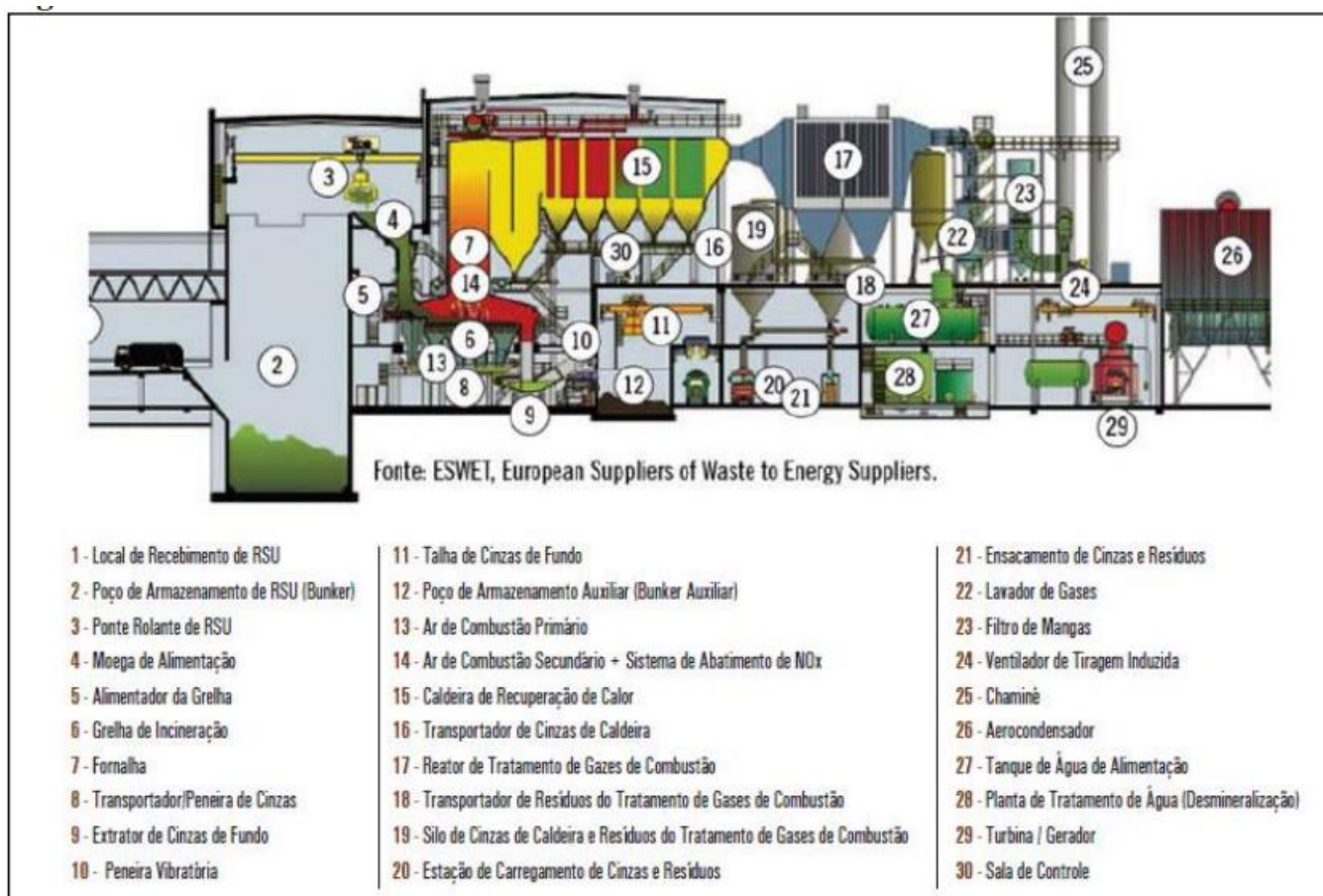
Fonte: <https://orizonvr.com.br>

A eficiência de produção de energia para conexão à rede desses sistemas é entre 18% e 27% podendo atingir patamares de 32% de eficiência máxima. No processo produtivo pode chegar a 30% para os casos de geração de eletricidade e para os casos de cogeração, a eficiência na produção energética pode chegar a 70%, sendo 20% na eletricidade e 50% na geração térmica (Utilitalia, 2020). A capacidade de produção depende da eficiência do processo de geração de calor em energia elétrica e dos índices de poder calorífico dos resíduos incinerados. Segundo dados da ISWA, as usinas realizam a geração de energia elétrica variando entre 600 kWh/ton a 1.000 kWh/ton de RSU em caso da cogeração de energia e calor (CHP), o que demonstra a real importância do WtE nas estratégias de geração de energia renovável, podendo-se atingir patamares de 2.000 kWh/ton de resíduos quando

há produção e recuperação de calor associado. A eficiência energética com média de geração de 600 kWh/ tonelada de RSU é 10 vezes maior se comparado aos aterros sanitários com captação de biogás (Dadario et al, 2023). Estima-se que uma usina de incineração na cidade de São Paulo teria a capacidade de geração de energia na ordem de 5,7 TWh por ano, produzindo eletricidade suficiente para suprir o consumo de aproximadamente 108.000 habitantes. A estimativa de geração de energia estipulada a partir do cálculo do número de habitantes de uma localidade demonstra que centros urbanos com 500.000 habitantes tem geração de resíduo aproximado de 331 ton/dia com a capacidade de geração de energia de mais de 45.000 MWh/ano enquanto uma cidade com 3.000.000 de habitantes tem a geração de resíduo calculada em 2.386 ton/dia e potencial de geração de 326.085 MWh/ano (Galavote et al, 2022).

A recuperação energética ocorre no resfriamento dos gases, que tratados durante o processo geram eletricidade e/ou energia térmica na troca de calor pelo vapor gerado na caldeira. O vapor produzido pela combustão pode ser utilizado diretamente pelos consumidores na indústria ou pelos moradores locais em função dos sistemas de distribuição de calor e de conexão à rede elétrica local. As áreas de tratamento e de produção dos subprodutos gerados pelo processo de incineração pode ser visto na Figura 7 da Usina de Recuperação Energética – URE.

Figura 7: Usina de Recuperação Energética de WtE - URE



Fonte: Dadario et al, 2021

Dentre as principais características associadas ao tratamento EfW podemos enumerar: (1) a forma segura e limpa de tratamento do resíduo em função dos eficientes processos de operação em relação ao design, a combustão, a filtragem e limpeza dos gases de efeito estufa, (2) últimas etapas de destinação do mix de resíduos, sujeira e materiais degradados, (3) possibilitar a reciclagem e a recuperação de materiais pelo tratamento de substâncias perigosas prevenindo formas de contaminação, (4) possibilitar a transformação do poder calorífico inerte existente nos resíduos para recuperar a geração de energia local não intermitente, confiável, sustentável e em parte renovável reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, (5) possibilitar a separação e reciclagem de metais e cinzas, (6) redução do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, (7) redução considerável das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (GEE), (8) significativo aporte financeiro para a construção e operação das plantas, (9) necessita ser sustentado por um arcabouço jurídico e legislativo com responsabilidades compartilhadas, (10) possibilita alianças entre o poder público e a iniciativa privada na gestão integrada das operações de construção,

operação e manutenção e compartilhamento dos riscos associados à gestão (PPP's), (11) exige o compromisso do setor de destinação do volume de RSU estimado entre 100k e 150k ton/ano, ao longo de 30 anos, (12) realiza a geração de energia com a venda e injeção na rede das concessionárias locais, (13) estimula o tratamento e a reutilização dos subprodutos dos RSU, (14) otimiza questões logísticas no gerenciamento dos RSU por estar próximo aos centros urbanos entre outros.

A tecnologia é capaz de recuperar metais e minerais remanescentes nas cinzas geradas pela combustão que podem ser reciclados formando novos produtos se transformando em matéria prima secundária para as indústrias (CEWEP,2019). As cinzas, que possuem partículas minerais não combustíveis, podem ser reaproveitadas na reciclagem, na construção de rodovias, prédios e para cobrir os resíduos destinados aos aterros sanitários. As cinzas podem representar 10% do volume de resíduos ou 20% a 30% da massa do RSU (Dadario et al, 2023).

O gás gerado é tratado em diferentes fases no processo com a utilização de filtros e elementos químicos para garantir que sua liberação na atmosfera seja segura e respeite os limites determinados pelos órgãos de proteção ambiental de cada localidade. Os valores associados à produção são apresentados em sequência em relação à experiência da União Europeia: (a) capacidade produtiva entre 6 e 50 ton/h e 50k e 400k ton/ano por linha de produção, (b) capacidade produtiva mínima recomendada de 150k ton/ano e máxima entre 300k e 500k ton/ano, (c) geração de energia de 120 GWh/ton/ano por de linha de produção, (d) disponibilidade de operação acima de 92%, (e) número de linhas de produção entre 1 e 3 linhas, (f) combustível é o resíduo sólido urbano, (g) possibilidade do terreno ser uma área cedida pelo poder público local, (h) controle de poluentes nas emissões, (i) recuperação entre 50% e 70% da energia dos materiais sendo até 25% sendo transformado em energia elétrica e o restante como calor, (j) custos de investimento (*capex*) feito por investidores com receitas geradas pelas taxas de tratamento dos resíduos ao longo de 25 anos, (k) projetos com significativa viabilidade devido a segurança nas cobranças das taxas de recebimento da matéria prima, (l) venda de energia na rede de distribuição é valorada entre 40 a 50 Eur/MWh. Outro estudo demonstrado por Dadario et al (2023), aponta que, em média, a tecnologia de incineração pode gerar entre 0,3 e 0,7 MWh de energia elétrica por tonelada de resíduo dependendo do tamanho da planta e do poder calorífico dos materiais.

Conforme dados da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), a quantidade ideal estimada de materiais a serem tratados nas usinas é da ordem de 100.000

ton/ano a 500.000 ton/ano, quantidade de RSU gerada em municípios entre 500.000 e 1 milhão de habitantes, por um período superior a 30 anos com o intuito de se otimizar o capital de investimento *capex* e de operação *opex* das plantas de WtE. Uma usina tem a estimativa de operação média acima de 30 anos e a amortização do *capex* se dá nos primeiros 20 anos de funcionamento da planta.

Uma usina Mexicana com capacidade de processamento de 4500 ton/dia de RSU e capacidade instalada de potência de 110MW, produz energia elétrica que é revendida no mercado a R\$ 414 MWh baseado no valor de coleta de *gate fee* de R\$ 80/tonelada de resíduos (Tisi, Y.S.A.B, 2019). Em 2014, o Reino Unido incinerou 35% do RSU produzido gerando 3.94 TWh, o que representa 1.1% de sua geração total de energia (Galavote, 2022).

De acordo com Dadario et al, 2023 a eficiência das plantas de WtE na conversão de energia elétrica atinge entre 20% e 25% de modo que, se todo o resíduo sólido urbano gerado no Brasil, de aproximadamente 192.000 ton/dia, fosse incinerado seria possível gerar entre 35 TWh e 50 TWh por ano, considerando a média entre 0,5 MWh a 0,7MWh/tonelada de RSU. Caso 80% do RSU do país fosse incinerado com eficiência de 30%, a eletricidade gerada seria da ordem de 2.902,6 GWh por mês, o que seria capaz de suprir cerca 25% das residências brasileiras.

Estudos da ISWA (2023) estimam que a entrada de 1 tonelada de RSU em uma usina térmica de incineração consome cerca de 5.500 kg de oxigênio na combustão, gera subprodutos como 250 kg de cinza contendo material não ferroso, vidro, silício, minerais e ferro, aproximadamente 50 kg de resíduo de biogás, com a geração de energia podendo variar entre 300 a 650 kWh/ton (entre 10% e 20% de consumo interno e de 300 a 1.400 kWh de geração de calor), com a utilização de 250 a 1.000 kg de água, 6 a 20 kg de reagentes e eliminando 6.600 kg de gás na atmosfera após serem tratados.

Um dos exemplos de usinas de WtE no Brasil, localizada na cidade de Barueri no estado de São Paulo, tem investimentos de R\$ 320 milhões para o tratamento de 825 ton/dia de RSU e capacidade de geração mensal entre 17 MWh de eletricidade e potência de 25 MW. A planta é abastecida por 3 cidades da região, Barueri, Carapicuíba e Santana de Parnaíba com tempo total de operação de 8.000 horas por ano durante 30 anos de vida útil (Dadario et al, 2023). Em Mauá/SP, a previsão é a capacidade de processamento de 3.000 toneladas/dia com potência de 80MW (Galavote, 2022).

O balanço de massa estudado na planta de incineração de Turin na Itália, com capacidade de tratamentos de 421.000 toneladas/ano de RSU, com poder calorífico médio de 11 MJ/kg, demonstra que a operação de combustão de 67,5 ton/hora gera aproximadamente 62 MWh de eletricidade atingindo 0,92 kWh/kg. Em 2018 a planta realizou o tratamento de 530.040 ton/ano de RSU gerando aproximadamente 399.111 MWh/ano (Utilitalia, 2020). Ou seja, considerando o tempo total de 8.000 h/ano de produção, foram processadas 66,25 ton/dia de rejeito com geração de aproximadamente 49,88 MWh ou 0,75 kWh/kg.

O resumo comparativo de algumas das vantagens e desvantagens da tecnologia de combustão por incineração pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens da tecnologia de Incineração

Vantagens	Desvantagens
Combustão por Incineradores	
<ul style="list-style-type: none"> * Processa diferentes tipos de resíduos * Reduz volume em 90% e a massa em 75% * Longa experiência internacional na aplicação e operação da tecnologia * Operação contínua com ganhos escalares * Aproveitamento energético ou térmico dos resíduos com poder calorífico acima de 8MJ/kg ou 1911kcal/kg * Área reduzida de instalação * Redução nos impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa quando a incineração é controlada * Eletricidade gerada de forma instantânea na incineração (600 kWh/ton) 	<ul style="list-style-type: none"> * Inviável para operação de pequenas plantas * Alto custo de investimento da usina * Viabilidade da planta condicionada a capacidade de processamento acima de 6.250 kg/h de RSU * Algumas regiões podem apresentar RSU com baixo poder calorífico * Formação de poluentes e agentes perigosos na combustão * Percepção ruim da sociedade pela emissão de poluentes * Percepção adversa da população com a tecnologia pela redução da reciclagem e emissão de poluentes

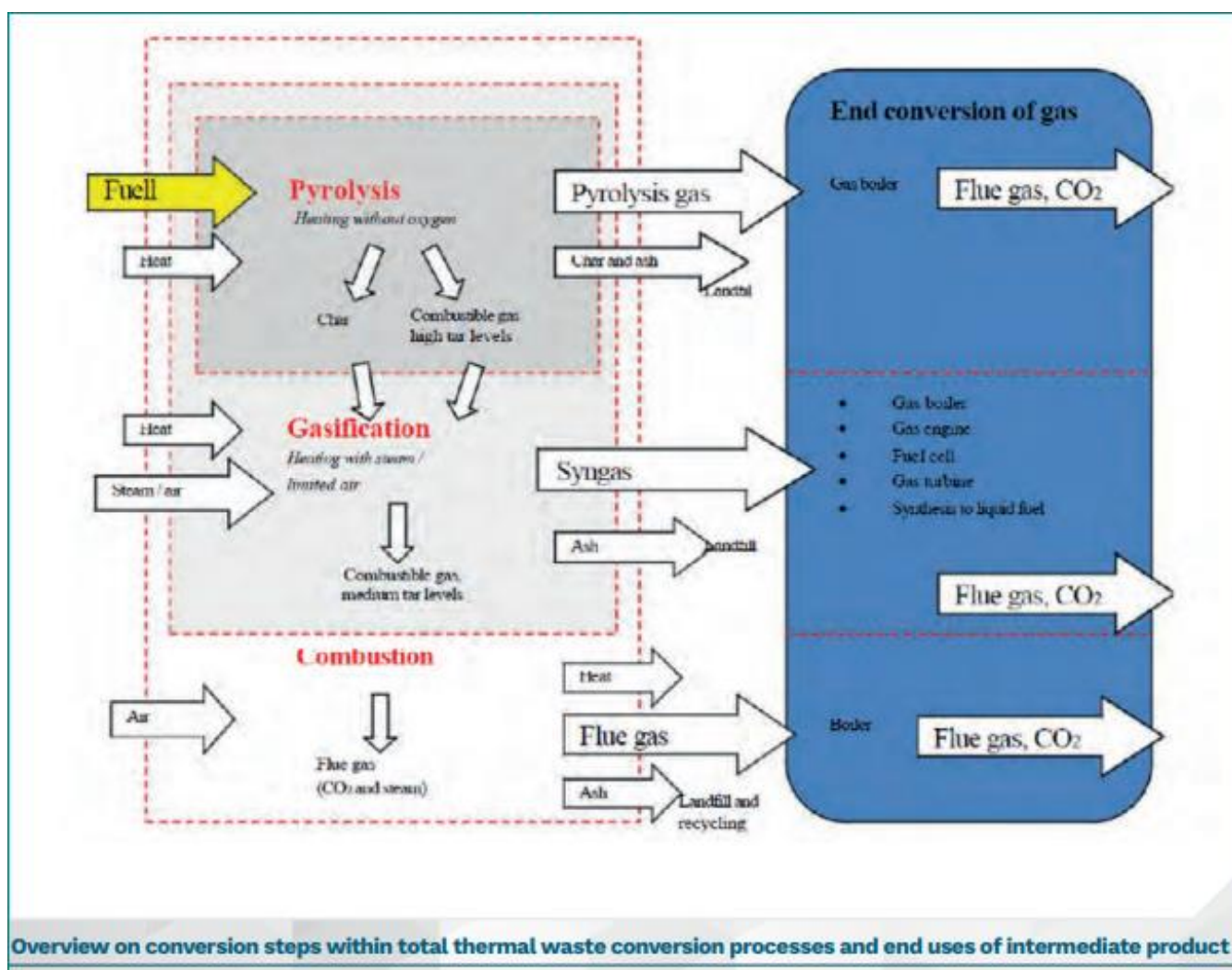
Fonte: Dadario et al, 2023

2.2 Tecnologias alternativas de WtE

As tecnologias alternativas como a Gaseificação e a Pirólise, geram produtos intermediários durante o processo de tratamento térmico mediante a introdução de um combustível extra para realizar a etapa de combustão para gerar energia. Ocorrem sem a aplicação de oxigênio ou com índices limitados de oxigênio e, dessa forma, o processo integrado e total de geração de energia nos métodos alternativos é compatível com a de combustão tradicional pela incineração que ocorre em somente um forno ou boiler, sendo

que os produtos gerados pelas tecnologias alternativas se enquadram como um pré-tratamento térmico como pode ser observado na figura 8. Entretanto, a combustão dos produtos intermediários do pré-tratamento comparada as condições de combustão tradicionais em forno único, leva a perdas térmicas e de eficiência de energia (ISWA,2013). A última planta europeia com utilização da tecnologia de Pirólise, parou de operar na Alemanha em 2015 com a baixa capacidade de tratamento de 26k ton/ano.

Figura 8: Esquema da geração de energia de sistemas alternativos



Fonte: ISWA, 2013

2.2.1 Pirólise

A Pirólise é uma tecnologia que utiliza um processo termomecânico de decomposição de material orgânico, com a utilização de combustível adicional podendo ser óleo ou gás, para gerar calor sem a presença de oxigênio em uma temperatura entre 500 °C e 800°C. Os produtos gerados no final da cadeia produtiva são o carvão, o óleo pirolítico e o *Syngas*, que são considerados produtos de elevado valor como combustíveis em processos de eficiência de conversão em turbinas e motores.

Os resíduos alimentadores das linhas de produção de combustão dessa tecnologia precisam ter granulometria reduzida e não aceita um conjunto de resíduos sólidos misturados e sem a prévia triagem (ISWA,2013). Tanto o gás de síntese (*Syngas*) quanto o carvão produzido, não podem ser utilizados como material combustível em processos secundários devido ao alto teor de poluentes e devem ser usados na própria planta sendo reintroduzidos no processo de combustão. Atualmente, somente no Japão há tecnologia de Pirólise ainda em operação em plantas de WtE. Devido ao alto custo operacional e por tratar pequenas quantidade de materiais, a Pirolise tem sido considerado como uma tecnologia com baixa viabilidade de operação nos grandes centros urbanos e ainda necessita de uma fonte externa de energia (Dadario et al, 2023). A Tabela 3 apresenta as vantagens e desvantagens do processo de Pirolise dos resíduos.

Tabela 3: Vantagens e desvantagens do processo de Pirólise

Vantagens	Desvantagens
Pirolise	
* Redução do volume do residuo entre 70% e 90%	* Tecnologia ainda em fase de testes
* Redução no tempo de tratamento do residuo	* Inviável em grande escala com objetivos comerciais
* Geração de subprodutos mais estaveis sem cheiro e agentes patogénicos	

Fonte: Dadario et al, 2023

2.2.2 Gaseificação

A gaseificação é o processo térmico de quebra do resíduo com baixos índices de oxigênio na produção de gás e sua maior aplicação acontece no Japão. O principal objetivo é converter grande parte do material sólido em combustível líquido ou em Gás de Síntese, o *Syngas*, com alto poder calorífico variando entre 10 MJ/kg e 18 MJ/kg apesar de requerer o pré-tratamento do material com secagem (Dadario et al, 2023).

O resíduo entra em contato com um reagente, composto por oxigênio, hidrogênio, vapor ou dióxido de carbono e a produção do Gás sintético realiza a recuperação energética por meio do aquecimento do vapor no boiler. O processo de gaseificação inclui o tratamento do *Syngas* para utilização em um processo de maior valor térmico nas turbinas ou motores de combustão e na transformação de combustíveis líquidos (ISWA,2023). Algumas plantas de *Syngas* podem atingir patamares de valor calorífico de 2 MJ/Nm³ a 4 MJ/Nm³ com incentivos governamentais na Inglaterra, no entanto, como as plantas de gaseificação não geram um gás limpo e tratados, ele precisa ser reutilizado na combustão de forma similar às plantas de combustão por incineração, mas de forma menos eficiente na recuperação energética. A gaseificação processada por estágios, trata o RSU a baixa temperaturas para a formação do *Syngas* que é utilizado como combustível para aquecimento do boiler e aplicação nas turbinas. A gaseificação realizada em temperaturas mais altas e introdução de oxigênio, gera o *Syngas* de maior qualidade transformando-o em subproduto para outras finalidades como produção de hidrogênio e combustíveis líquidos (ISWA, 2013). A Tabela 4 apresenta as vantagens e desvantagens do processo de gaseificação dos resíduos.

Tabela 4: Vantagens e desvantagens da tecnologia de Gaseificação

Vantagens	Desvantagens
Gaseificação	
* Aplicavel em pequena e média escala	* Elevado custo operacional
* Possibilidade de utilização dos Syngas em equipamentos termicos de alta eficiência	* Necessidade de pré tratamento do residuo para reduzir humidade de gravimetria
* Gera menos poluentes e tem resultados mais favoráveis ao meio ambiente	* Tecnologia ainda em fase de testes
* Gera menos subprodutos do tratamento do residuo	* Inviável em grande escala com objetivos comerciais

Fonte: Dadario et al, 2023

2.2.3 Gaseificação por Plasma

Processo de tratamento alternativo por meio da gaseificação por Plasma permite tratar pequenas partes de resíduos com elevado potencial de contaminação. Esse método é mais eficiente quando realizado em dois estágios em que ocorre inicialmente a produção do *syngas* no gaseificador e que depois de tratado com a aplicação do plasma, o gás se torna mais eficiente para a utilização em motores. No mundo atualmente, essa tecnologia é

raramente empregada sendo um complemento dos processos de gaseificação e não atinge resultados satisfatórios que justifiquem economicamente a sua operação.

2.3 Cadeia de Suprimentos e Custos do WtE

Avaliar a cadeia de valor do sistema de WtE significa considerar de forma integrada uma série de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) para o adequado funcionamento do setor. Elementos de engenharia de produto, fatores energéticos, de infraestrutura de coleta e tratamento de resíduos, a geração de subprodutos, aspectos financeiros, legislativos e governamentais, processos bioquímicos, produção de gás e tarifários de energia elétrica estão intrinsicamente ligados compondo as estratégias de implantação e desenvolvimento das tecnologias de tratamento térmico por incineração. O esquema da cadeia de valor operacional do WtE relaciona aspectos financeiros bem como estudos de eficiência, produtividade, disponibilidade de operação, custos de produção e receitas operacionais para se viabilizar economicamente um projeto em maior escala e de alto valor agregado.

A aplicação de tecnologias experimentadas e comprovadamente testadas é essencial para garantir a participação dos atores locais e investidores no projeto. O comprometimento das entidades públicas que gerenciam a coleta e distribuição dos resíduos municipais é de tamanha importância que interfere significativamente nos estudos de longo prazo de viabilidade econômica do empreendimento pois é sugerido que uma planta de WtE receba em média entre 100k e 150k toneladas/ano de RSU durante aproximadamente 30 anos (ISWA,2022). Os custos de tratamento dos resíduos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Custos de tratamento de RSU

Custo estimado para diferentes tipos de tratamento				
World Bank Project Data (Nominal Date 2006)	Países subdesenvolvidos	Países em desenvolvimento (baixo)	Países em desenvolvimento (alto)	Países desenvolvidos
Geração de resíduo (kg/cap/ano)	220	290	420	780
Cobertura de coleta domiciliar (% de atendimento)	43%	68%	85%	98%
Custo de coleta e destinação (USD/ton)				
Coleta	20-50	30-75	40-90	85-250
Aterro Sanitário	10 a 30	15-40	25-65	40-100
Lixão	2 a 8	3 a 10	NA	NA
Compostagem	5 a 30	10 a 40	20-75	35-90
WtE Incineração	NA	40-100	60-150	70-200
Digestão Anaerobia	NA	20-80	50-100	65-150

Fonte: UNEP, 2019

Custos operacionais variam significativamente conforme o desenvolvimento econômico e regional do país, o tempo total de vida de operação da planta e ao tipo de tecnologia aplicada.

Custos de investimentos e de operação das usinas são determinantes na decisão de implantação da tecnologia. Estima-se que, na Europa, usinas de WtE com 40 anos de operação tenham 85% dos custos totais atribuídos a custos operacionais enquanto plantas em países em desenvolvimento esse montante pode atingir até 50% (UNEP,2019). Investimentos abrangem custos estudos de projeto, planejamento, instalação, permissões, terreno, aquisição de equipamentos e construção enquanto os custos operacionais envolvem as contratações, combustíveis, energia, manutenção, reparos, controle de emissões, monitoramento, taxas de coleta, venda de energia, comunicação pública, gestão, administração dos recursos, disposição segura dos resíduos, custos de riscos e acidentes e descomissionamento da planta. Todo esse escopo torna a tecnologia de incineração uma das mais caras para a implantação (UNEP, 2019). A instalação e operacionalização demandam um significativo aporte financeiro por parte de investidores e exige o comprometimento de atores já que as principais receitas geradas advêm das taxas de coleta e recebimento dos resíduos para tratamento, pela venda de energia disponibilizada na rede da concessionária e pela geração de calor que pode ser direcionado para consumidores locais (ISWA,2022). Outra fonte importante de receita advêm dos subprodutos gerados pela combustão dos resíduos incluindo o gás, as cinzas e materiais metálicos que são eliminados como rejeitos da incineração. Estudos de viabilidade são normalmente projetados para períodos acima de

25 anos a fim de garantir a rentabilidade dos investimentos no financiamento do *capex* das usinas. A Associação Internacional de Resíduos Sólidos (2013) aponta que as taxas de entrada dos resíduos para tratamento cobrem somente parte dos custos de investimento (*capex*) e de operação (*opex*). Uma planta térmica de incineração, com capacidade de tratamento de 150K ton/ano, pode atingir o *capex* da ordem de 150M€ com custos operacionais de 40-50€/ton sendo pagos em parte pela venda de energia na rede, que pode representar de 20-30€/ton. Nos países desenvolvidos, projeta-se que os custos operacionais de tratamento do resíduo incluindo coleta, transporte, tratamento e destinação correta ultrapassa valores de USD 100 por tonelada enquanto nos países em desenvolvimento e mais pobres os valores de custos operacionais podem variar entre USD 20 – USD 50 por tonelada (World Bank, 2018). A Tabela 6 mostra estudos da UNEP 2019 quanto aos valores de investimento em usinas térmicas em países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Tabela 6: Custos associados a usinas térmicas de WtE

Custo estimado de usinas térmicas de WtE						
Economia	Investimento inicial (Milhões EUR)	Custo de Capital (EUR/ton)	Operação e Gestão (EUR/ton)	Custo Total (EUR/ton)	Receita com venda de energia (EUR/ton)	Custos remanescentes (EUR/ton)
Países desenvolvidos	135-185	80-115	180	260-295	60 (Calor e eletricidade) e 27 (eletricidade)	200 - 235
Países em desenvolvimento	30-75	22-55	20-35	42-90	2-10 (eletricidade)	40-80

Fonte: UNEP, 2019

Estima-se que o aumento do poder calorífico dos resíduos em 25% aumentaria a capacidade térmica da planta em 25%, representando um aumento de *capex* da ordem de 15%. Significa também, o aumento de receita com energia em aproximadamente 25% mantendo-se os custos de *opex* no mesmo patamar. Estudos de Galavote (2022), apontam que os custos de recuperação energética das plantas de incineração podem chegar a 57,70 USD/tonelada de resíduo tratado, considerando que as receitas advindas da venda de energia para a rede elétrica são de, aproximadamente, 32,24 USD/tonelada, enfatizando que os custos de instalação e operação são maiores se comparados as demais tecnologias em função do valor dos sistemas de controle de emissão e limpeza dos gases para filtrar dioxinas, partículas sólidas e resíduos ricos em metais como poluentes serem significativamente relevantes. Comparativamente entre as diferentes tecnologias de WtE, demonstra-se que há maior valor de investimento necessário para a implantação de uma usina térmica de

incineração, no entanto, ela possui maior potencial de geração de energia elétrica e maior abrangência de utilização no mundo conforme apresentado nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Comparativo de destinação dos resíduos para diferentes tecnologias

Parameter	Landfill	Incineration	Anaerobic digestion
Investment (106 US\$.t ⁻¹)*	10.37	54.32	12.05
Unit cost (US\$.kW ⁻¹)*	3,010.37	5,562.06	4,200.49
Energy (GWh.year ⁻¹)*	24.11	68.44	20.10
Potencial (kW)*	3,440	9,766	2,867
Technology readiness level	CE: US, LA, EU, EA	CE: EU, US, EA ECD: LA; Africa, Australia	CE: EU, US, EA ECD: LA, Africa
Land use	High	Low	Low
Odors	High	Low	Low
Environmental impact	High	Mid/High	Low
Technical difficulty	Low	High	Mid

*Study conducted by SANTOS et al. (2019) for the city of São José dos Campos, located in the state of São Paulo-BR, with population exceeds the 500,000 inhabitants. CE: Commercially Established; ECD: Early Commercial Deployment; EU: European Union; US: United States of America; EA: East Asia; LA: Latin America.

Fonte: Galavote et al, 2022

Tabela 8: Custo de investimento x custo operacional de recuperação de energia

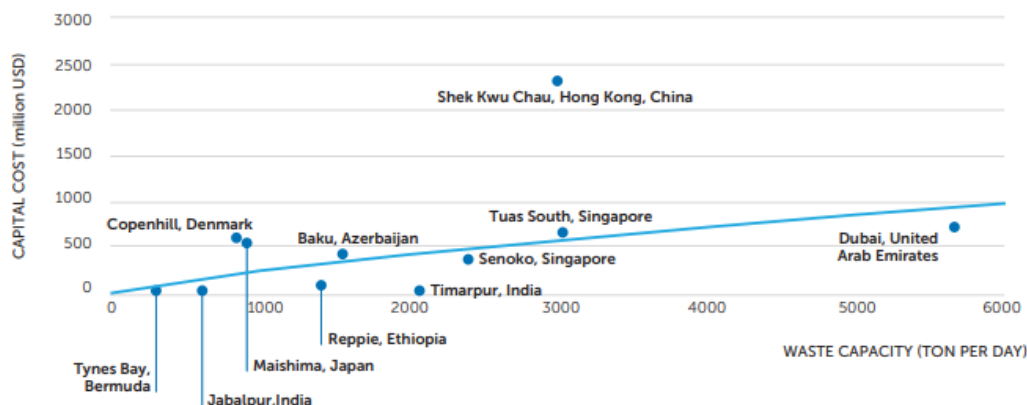
Technology	Investment costs (US\$.t ⁻¹ .year ⁻¹)	Operation costs (US\$.t ⁻¹ .year ⁻¹)
Incineration	400-700	40-70
Pyrolysis	400-700	50-80
Gasification	250-850	45-85
Anaerobic digestion	50-350	5-35
LFG recovery	10-30	1-3

Fonte: Galavote et al, 2022

Estudos elaborados pela UNEP 2019 em países desenvolvidos, demonstrados na figura 9, apontam para a intrínseca relação entre a capacidade de tratamento de uma usina com os custos de capital para sua implantação demonstrando que quanto maior a capacidade de processamento da planta, maiores são os custos de *capex*, conforme demonstrado na Figura 10, influenciado por fatores de custo de mão de obra, importação dos equipamentos da tecnologia e fatores regulatórios de cada localidade. Em Hong Kong, uma planta em fase de comissionamento com capacidade de 3.000 toneladas/dia tem um custo de capital de USD

2 bilhões e custos operacionais projetados em 15 anos da ordem de 1.7 bilhões de dólares, representando 85% do custo de capital (UNEP, 2019).

Figura 9: Custos de capital x capacidade de tratamentos de RSU



Fonte: UNEP 2019

Estudos levantados pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas demonstram que as receitas geradas pela venda da energia, seja por calor ou eletricidade, cobre parte dos custos operacionais e dispositivos adicionais de receitas diretas e indiretas devem ser aplicados na gestão das usinas, como taxas de deposição dos rejeitos (*gate fee*), taxas de coletas aplicadas ao contribuintes, taxas de deposição em aterro sanitário, subsídios governamentais, fundos internacionais e investimentos de participação público privado são algumas alternativas. Uma planta que opere durante 7.500h/ano ao invés de 8.000h/ano pode apresentar a necessidade de aumentos nas taxas de entrada de materiais *gate fee* para melhorar a rentabilidade da produção e maior equilíbrio econômico de operação. Na China, em contrapartida, as plantas recebem isenção fiscal de 5% sob a receita e pagam uma tarifa reduzida de energia de 0,04 USD/Kwh e recebem taxas para o depósito de rejeitos do governo local (UNEP,2019).

Quanto a relação entre o valor de investimento (*capex*), capacidade de produção e valor por MWh, percebe-se que quanto maior a capacidade de tratamento da usina, maiores são os custos de *capex* associados e a redução do valor do MWh de energia gerada. Sendo os custos de O&M das plantas de incineração bastante significativos podendo chegar até 80% do valor do custo de capital ao longo do ciclo de vida da planta.

2. A GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL E ASPECTOS REGULATÓRIOS

No Brasil, a geração de resíduos sólidos aumentou de 66,6 milhões/ton em 2010 para 82,4 milhões/ton em 2020 e, conseqüentemente, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 390 kg/ano. Além disso, a coleta de 58,7 milhões de toneladas anuais cresceu para 76,1 milhões nesse mesmo período, resultando no aumento da quantidade coletada per capita de 307,1 kg para 359,3 kg por habitante anualmente, ou seja, uma mudança de 0,841 kg/hab/dia para 0,984 kg/hab/dia (VIEGAS, 2022). Em 2022, dos quase 80 milhões de toneladas de RSU gerado no Brasil, 40% tiveram destinação final ambientalmente inadequada em terrenos desprotegidos, rios e o mar (ABREMA, 2024). A região Sudeste lidera representando 50% do total de resíduos gerados o que equivale a 450 kg por habitante anualmente em uma abrangência de 93% de cobertura de coleta (ABREMA). Dadario et al (2021) apresenta que 36% das cidades brasileiras (2.049) destinam o RSU para aterros sanitários com municípios concentrados principalmente na região sul e sudeste, 10,9% das cidades (607) destinam os resíduos para o aterro controlado e 19,2% (1.067) tem como destinação final do RSU o lixão. Atualmente no país, cerca de 80% do RSU é queimado e 20% é reciclado e, dessa taxa, 24,5% é convertido em energia na quantidade de 200 kWh por tonelada de resíduo. A tabela 9 apresenta dos dados de geração de RSU nas regiões brasileiras em 2010 e 2020 especificamente demonstrando que as regiões sudeste e nordeste concentram a maior parte dos resíduos sendo respectivamente 49% e 26% do total de resíduo gerado.

Tabela 9: Geração de Resíduos Sólidos Urbanos nas regiões brasileiras 66.695,71

Região	Quantidade (Toneladas)	
	2010	2020
Norte	4.406.280	6.103.320
Nordeste	17.397.725	20.371.893
Centro-Oeste	5.076.055	6.185.797
Sudeste	32.652.900	40.991.218
Sul	7.162.760	8.907.548
Minas Gerais	4.755.206	4.908.263

Fonte: ABRELPE, 2020; ABRELPE, 2021; SNIS 2022.

Fonte: VIEGAS, 2022

Analisando a composição gravimétrica do RSU indicada pelo Plano Nacional de Resíduo Sólido do Ministério de Meio Ambiente, o poder calorífico do RSU no Brasil é de

8,6 MJ/Kg sendo que outros autores consideram uma faixa entre 6,5 MJ/Kg e 9,0 MJ/kg (Galavote, 2022).

No país foram registrados em 2019, 39 usinas termoelétricas de geração a biogás com potência total instalada de 186 GW (Galavote et al, 2022). Dadario et al (2023) afirma que as 22 plantas com capacidade instalada de 164,32 MW de potência, representando 0,09% da matriz energética nacional, geram em média 65 kWh de eletricidade por tonelada (Dadario et al, 2023). Conforme dados da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) o Brasil possui 86 plantas de recuperação energética de RSU com a capacidade de processar 25 milhões de toneladas de resíduos anualmente gerando 2720 MW de eletricidade. O biogás produzido nos aterros sanitários brasileiros poderia gerar energia suficiente para abastecer 38.000 habitantes no país (Galavote et al, 2022). Custos estimados de instalação chegam entre 10 e 30 USD/tonelada/ano de RSU e os custos operacionais são estimados entre 1 e 3 USD/tonelada/ano do material, ou seja 10% do valor do custo de capital estimado de investimento (*capex*). Quanto a geração de energia, o biogás apresenta um dos patamares mais baixos entre as tecnologias de WtE alcançando índices de 0,2 MWh por tonelada.

3.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei nº 12.305/10) integra a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81) e articula-se com a Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/07), que tem como um de seus principais instrumentos o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) (Planares, 2022). Assim, os planos de resíduos sólidos estaduais, microrregionais, de regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas, intermunicipais e municipais deverão estar em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS e com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares (Decreto 11.043, 2022). A PNRS dispõe sobre princípios, objetivos e instrumentos e determina as diretrizes para a gestão integrada e as atividades de gerenciamento do resíduo sólido definindo as responsabilidades dos geradores, poder público e da sociedade civil organizada. O poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade das ações voltadas para assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos e das diretrizes e demais determinações estabelecidas nesta lei e em seu regulamento (PNRS, Art. 25).

No plano são apresentadas as terminologias utilizadas no setor que servem como base conceitual importante do tema destacando-se no Art 3º: (a) Ciclo de vida do produto, (b) Coleta seletiva, (c) Destinação final ambientalmente adequada, (d) Disposição final ambientalmente adequada, (e) Geradores de resíduos sólidos, (f) Gerenciamento de resíduos sólidos, (g) Gestão integrada de resíduos sólidos, (h) Logística Reversa, (i) Reciclagem, (j) Rejeitos, (l) Resíduos sólidos, (m) Responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, (n) Reutilização, (o) Serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.

Dentre os princípios e objetivos estabelecidos na legislação do PNRS podemos destacar a orientação para a aplicação da gestão do RSU por meio de uma visão sistêmica em que se considere aspectos ambientais, sociais, culturais, econômicos, tecnológicos e de saúde pública, para o desenvolvimento sustentável desde o fornecimento, à produção e o consumo dos recursos naturais, a necessidade de cooperação entre os agentes públicos e privados da cadeia produtiva e a necessidade de conscientizar a sociedade no reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem de valor social e econômico. Com isso, parte-se de premissas importantes de que para se estabelecer um gerenciamento eficaz e contínuo dos resíduos sólidos, deve-se ser observado e desenvolvido a hierarquia lógica de não geração, redução, reutilização, reciclagem (3 R's) e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Outros fatores de grande relevância são associados aos investimentos em tecnologias limpas para se reduzir os impactos ambientais, os incentivos a indústria de reciclagem, a gestão integrada entre os diversos atores considerando a capacitação técnica e a regularidade na prestação do serviço público de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos.

Para se executar as diretrizes apresentadas pelo PNRS alguns instrumentos são delineados afim de se alcançar os devidos resultados da gestão dos recursos e no controle dos processos sendo: a criação e aplicação dos planos nacional, estadual e municipal de gestão do resíduo sólido com inventários e sistemas de declaração dos montantes gerenciados localmente, a aplicação da coleta seletiva e logística reversa junto aos fabricantes no intuito de se compartilhar a responsabilidade no ciclo de vida do produto, nos incentivos de formação e atuação das cooperativas e associações de catadores de materiais, na cooperação técnico-financeira entre setor público e privado, na educação ambiental da sociedade e no que tange aos incentivos fiscais e de crédito (PNRS,2022).

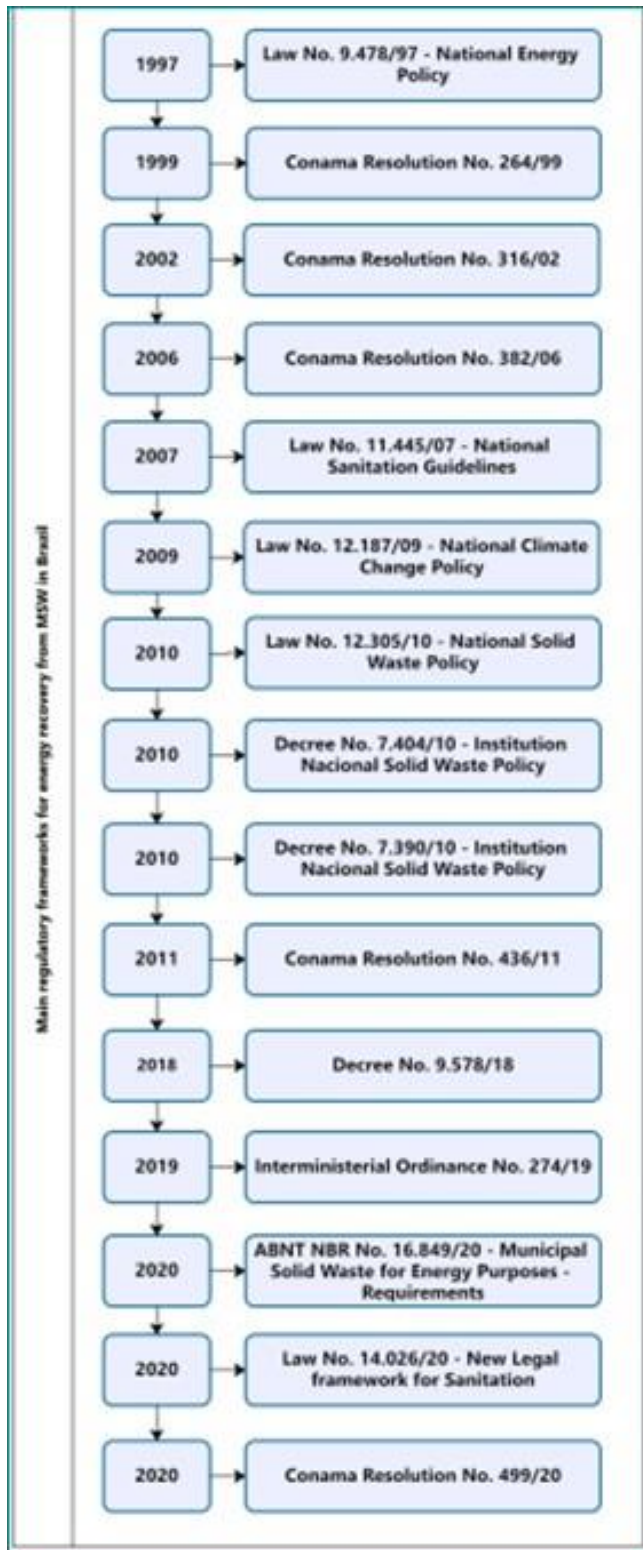
No âmbito da recuperação energética dos RSU, poderão ser utilizadas tecnologias desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (PNRS Art 9º, § 1º). E que a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada deve ser compartilhada abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Dessa forma, é responsabilidade da sociedade as ações praticadas, os volumes de consumo e os modos de descarte dos materiais.

O gerenciamento integrado entre os diversos setores e agentes produtivos da cadeia do ciclo de vida dos materiais é complexa e exige uma coordenação de atores e entidades público-privadas com a participação de toda a sociedade para que possa ser buscado alcançar as determinações, metas e resultados estabelecidos na política e nos planos vigentes. Exemplificando tal fato, o Decreto 7.404 que aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, orientado pela Política Nacional, Lei 12.305, no seu Art.3º institui o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos com a finalidade de apoiar a estruturação e implementação da referida lei, por meio da articulação dos órgãos e entidades governamentais para possibilitar o cumprimento das determinações e das metas previstas. O comitê é formado por representantes do (a) Ministério do Meio Ambiente, (b) Casa Civil da Presidência da República, (c) Ministério das Cidades; (d) Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome, (e) Ministério da Saúde, (f) Ministério de Minas e Energia, (g) Ministério da Fazenda, (h) Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, (i) Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, (j) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, (k) Ministério da Ciência e Tecnologia, (l) Secretaria de Relações Institucionais da Presidência da República.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o padrão brasileiro relacionado ao WtE na NBR 16.849/20 em que estabelece as diretrizes para a recuperação energética do RSU incluindo ou não a utilização de resíduos não perigosos (Dadario et al, 2023). Uma linha do tempo, apresentada na figura 10, contendo os principais marcos regulatórios do tratamento do RSU no Brasil enfatiza a lei 9.478/97 da Política Nacional de Energia, diversas resoluções do Conama, a lei 11.445/07 de Saneamento Básico, a lei 12.187/09 da Política Nacional de Mudança do Clima e a lei 12.305/10 da Política Nacional de Resíduo Sólido. Ainda complementando o corpo legislativo existente, a Resolução

CONAMA 316 dispõe sobre procedimentos e critérios para funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, e orienta que a queima dos RSU deve ocorrer quando a separação para a reciclagem é de no mínimo 30%.

Figura 10: Marcos regulatórios do tratamento do RSU



Fonte: Dadario et al, 2023

3.2 O Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Sob coordenação do Ministério do Meio Ambiente – MMA, a União foi responsável por elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos que contém elementos importantes para a orientação das atividades no gerenciamento de toda a cadeia do setor incluindo os diagnósticos da situação atual dos resíduos, o estudo das tendências internacionais, a definição das metas de redução, reutilização e reciclagem objetivando destinar menos materiais e rejeitos para os locais de disposição final ambientalmente adequados, as metas para o aproveitamento energético dos gases gerados, metas para eliminação dos lixões, definição das normas técnicas para acesso aos recursos da União que visa atender a ações e programas de interesse dos resíduos sólidos, as normas para a disposição final dos rejeitos e dos meios para o controle e a fiscalização da operacionalização das medidas.

3.3 O Plano Estadual de Resíduo Sólido

Os estados da federação, por meio da criação do Plano Estadual de Resíduos Sólidos, estão incumbidos de promover a integração da organização, do planejamento e da execução das funções públicas de interesse comum relacionadas à gestão dos resíduos sólidos nas regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e microrregiões, controlar e fiscalizar as atividades dos geradores sujeitas a licenciamento ambiental e possibilitar a atuação de forma a apoiar ou priorizar as iniciativas do município de soluções consorciadas ou compartilhadas entre dois ou mais municípios. É também por meio do plano que os estados têm acesso a recursos da União destinados a empreendimentos e serviços relacionados à gestão de resíduos sólidos, ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito.

Nas diretrizes para a criação do Plano Estadual de Resíduos Sólidos também são estabelecidas as orientações quanto a hierarquia de geração de resíduos e de transformação energética quanto a metas de redução, reutilização, reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada. É de responsabilidade dos estados realizar os diagnósticos e a

identificação dos principais fluxos de resíduos considerando seus impactos socioeconômicos e ambientais a fim de estabelecer a proposição de cenários possíveis para dinâmica do setor e ainda estabelecer e fiscalizar o cumprimento de metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos (PNRS, 2022).

3.4 O Plano Municipal de Gestão integrada do Resíduo Sólido

A criação do Plano Municipal de Gestão Integrada do Resíduo Sólido – PMGIRS é condição fundamental para que os municípios tenham acesso aos incentivos fiscais e recursos da União destinados a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos sejam eles orientados para a atuação consorciada intermunicipal ou de forma voluntária nos planos microrregionais e implantarem os serviços de limpeza urbana com a coleta seletiva por meio da participação das cooperativas ou associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. O plano deve conter os requisitos básicos de identificação e diagnóstico da situação atual dos resíduos gerados no território, definir as áreas potencialmente favoráveis para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, definir as possibilidades de atuação consorciada com outros municípios, na identificação dos atores locais da cadeia produtiva para a implantação de ações voltadas a logística reversa, na divulgação dos indicadores de desempenho, nos programas e ações de capacitação técnica e de educação ambiental para se buscar alcançar a lógica hierárquica de consumo com menos geração de resíduos e conseqüentemente menos necessidade de destinação final e tratamentos dos mesmos. Fica a cargo também do município, desenvolver as ferramentas de controle, fiscalização e monitoramento definindo as ações preventivas e corretivas no gerenciamento dos planos dos resíduos sólidos.

3.5 O Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos

Para aqueles geradores de resíduo sólido que se enquadram na classificação de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos de mineração e ainda o grupo dos estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços que geram resíduos perigosos ou que, mesmo caracterizados como não perigosos, por sua natureza, composição ou volume, não sejam equiparados aos resíduos

domiciliares pelo poder público municipal e as empresas de construção civil, estão sujeitos à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos definidos pelo Art.20º do PNRS ainda que o município, respectivamente, não apresente o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduo Sólido. Para as empresas de transporte e para os responsáveis por atividades agrossilvopastoris é exigido a elaboração do Plano conforme as normas e regulamentos estabelecidos pelos órgãos competentes. Importante salientar que o Plano de Gerenciamento do Resíduo Sólido atenderá ao disposto no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do respectivo município, sem prejuízo das normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa (PNRS, Art. 21, IX, § 1º)

3.6 Waste to Energy no Brasil

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2024) apresenta que o Brasil tem 226 GW de capacidade instalada em que as usinas hidroelétricas (UHE), incluindo as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) respondem pela maior participação na geração de eletricidade de 60,2% (425.996 GWh) seguido pelas demais fontes (Eólica, Biomassa, Gás Natural, Solar, Nuclear, Carvão, Petróleo e outras) que em conjunto que representam 39,8%. A biomassa contribui com 7,6% da geração de eletricidade totalizando 53.854 GWh. No ano de 2023, a oferta interna de energia no Brasil registrou um aumento de 3,5% em relação a 2022 com significativa participação das renováveis na matriz energética com 49,1% da geração total. A biomassa da Cana contribuiu com 16,9% desse montante e outras fontes renováveis de com 7,2%, incluindo a participação do biogás com 2%. Tise et al (2023) aponta que o potencial estimado de produção do biogás é 84,6 bilhões de Nm³/ano, no entanto a geração em 2021 chegou somente a 2,3 bilhões de Nm³/ano sendo que 70% da geração ocorre em aterros sanitários, o que representa 751 GWh. A Análise de Conjuntura de Biocombustíveis realizado pela EPE aponta que, em 2023, o biogás alcançou a capacidade instalada em geração distribuída de 131 MW em 508 unidades geradoras com insumos provenientes dos resíduos gerados nas atividades agroindustriais, animais e resíduos urbanos.

O consumo total de energia elétrica no Brasil em 2023 atingiu o patamar de 532 TWh o que demonstra um aumento de 4,4% em relação ao ano anterior sendo que a região sudeste lidera o ranking de maior consumidora de energia nos últimos 10 anos com média de 49,5%

seguido da região sul do país com 18,2%, nordeste com 17,2% e centro oeste e norte com 7,8% e 7,2% respectivamente.

Sob o aspecto da geração de RSU, a região sudeste do Brasil lidera a produção de resíduos seguido pela região nordeste, que gera aproximadamente 25% do total de resíduos e, mesmo diante das diversas tecnologias existentes no mercado, o aproveitamento energético dos resíduos ainda é incipiente nacionalmente. A grande parte do RSU ainda é destinado a grandes lixões, aterros ou aterros sanitários em que a recuperação energética ainda não acontece de forma significativa.

A regulamentação e a base jurídica têm sido estruturadas a nível federal, estadual e municipal, com a participação de diferentes entes federativos, na determinação de leis, decretos e resoluções que possam orientar e organizar o desenvolvimento no âmbito nacional. No entanto, o país ainda carece da gestão coordenada e investimentos que possibilitem o correto destino dos RSU retirando-os de ambientes insalubres e de espaços que geram a disseminação de doenças e poluição ambiental pela queima indiscriminada ou pela contaminação do solo. Um dos impasses da utilização da WtE é a emissão de poluentes atmosféricos oriundos do tratamento dos resíduos sólidos, mas, mundialmente, já existem políticas públicas e sistemas de controle de poluentes aplicados ao WtE que gerenciam as emissões de gases de efeito estufa. Destaca-se ainda, que o Brasil conta com um arcabouço legal bastante robusto que regulamenta e define limites de emissão dos gases com maior potencial de poluição. Esse cenário sinaliza o grande potencial para implantação de usinas WTE, com capacidade de geração de benefícios ambientais e de acréscimo da oferta de energia (Albuquerque, 2024).

Um dos maiores problemas enfrentados pelo Brasil é a gestão deficiente dos RSU gerando significativos problemas ambientais e de saúde pública. O modelo de gerenciamento dos resíduos aplicado atualmente está cerca de 50 anos atrasado se comparado aos métodos aplicados nos países desenvolvidos. O país produz anualmente 83 milhões de toneladas de RSU sendo que aproximadamente 90% da população tem acesso ao serviço de coleta. A composição geral dos resíduos gerados contém, em média, 45,3% de matéria orgânica, 16,8% plástico, 10,4% papel, 5,6% têxtil/couro/borracha, 2,7% vidro e outros materiais representam 15,5%. Desse montante, somente 1,9 milhão de toneladas passam pela coleta seletiva e somente 1 milhão do RSU é efetivamente reciclado. As alternativas de recuperação energética são timidamente aplicadas nacionalmente dando-se maior destaque para a utilização da tecnologia de tratamento biológico como a digestão anaeróbia (Tisi, 2023). Até

o momento, a recuperação energética por tratamento térmico incluindo a incineração, a gaseificação, pirólise e a co-combustão ainda é praticamente inexistente no Brasil como forma de tratamento em larga escala, com exceção dos investimentos previstos nas usinas do estado de São Paulo que estão projetados para início da operação em 2025. Apesar do poder calorífico médio do RSU no Brasil apresentar taxas entre 8 e 10 MJ/kg (1.900 – 2.400 kcal/kg) sendo o suficiente para os tratamentos por meio da incineração (Tisi et al, 2022). O cenário brasileiro é preocupante pois, dos 60% do RSU coletado no país, 40% desse total é redirecionado para os lixões e aterros onde não existe a estrutura para a coleta de chorume e biogás. Conforme afirma Tisi et al, 2022, o Brasil tem uma cultura orientada para a utilização de aterros sanitários e por esse motivo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos ABREN, que integra o *Waste to Energy Research and Technology Council – WtERT*, tem trabalhado em conjunto para desenvolverem uma política virtuosa de gestão de resíduos efetiva no país.

4. GERENCIAMENTO DO RSU EM BELO HORIZONTE - MG

4.1 Agentes locais da gestão do RSU

Para compreender a dinâmica dos processos produtivos do *Waste to Energy* e do conjunto de tecnologias para se gerar energia, é perceptível que toda a cadeia de produção na gestão do RSU deva agir de forma integrada para a recuperação do potencial energético dos diferentes materiais. Dessa forma, os atores locais do setor e a sociedade civil organizada devem atuar e contribuir nas etapas do manejo do RSU para otimizar a adequada aquisição e destinação dos materiais para que se busque também processar a geração de energia. A pesquisa de campo realizada na cidade de Belo Horizonte foi conduzida com entrevistas a 4 atores locais responsáveis pelas atividades relacionadas à gestão dos resíduos sólidos urbanos com atividades e responsabilidades diferentes dentro da cadeia produtiva. Foram visitados e entrevistados os gerentes operacionais de duas cooperativas de triagem de materiais da cidade, o gerente operacional do aterro sanitário CTRS BR040 e o coordenador da Superintendência de Limpeza Urbana (SLU), autarquia municipal responsável pelo planejamento e execução das atividades de gerenciamento da limpeza urbana da cidade, como na tabela 10.

Ao todo, seis cooperativas estão autorizadas pela prefeitura para percorrer 55 bairros da capital que estão divididos em distritos pela SLU. A região definida para a coleta dos resíduos é definida pela autarquia local que gerencia a atividade na cidade, a SLU. Cada cooperativa tem a concessão para prestar o serviço de coleta e triagem dos resíduos diariamente/semanalmente em locais predefinidos conforme o tipo de resíduo. Após a coleta, o material é depositado nos galpões espalhados em diferentes áreas na cidade para ser identificado, triado, pesado e registrado para ser negociado o seu valor de venda no mercado.

Tabela 10: Lista dos atores locais entrevistados

Atores entrevistados	Entidade
Superintendente	Autarquia Municipal - SLU
Presidente	Coopesol - Cooperativa Solidária dos Trabalhadores e Grupos Produtivos da Região Leste
Presidente	Coomarp - Cooperativa Solidária dos trabalhadores em Materiais Recicláveis da Pampulha
Gerente Operacional	Aterro Sanitario CTRS BR040

Fonte: Próprio autor

4.2 Dados do RSU de Belo Horizonte

Com o aumento na geração dos resíduos domiciliares, a quantidade de materiais dispostos para coleta e serviços de limpeza urbana em Belo Horizonte também cresceu, levando a um total de 766.550 toneladas geradas em 2020 pela população estimada de 2.503.701 habitantes. Diferente do cenário brasileiro e da região Sudeste que superam a geração de RSU de 1 kg/per capita/dia, o município atingiu 0,830 kg por dia. A Tabela 11 ilustra a geração per capita na cidade no período de 2010 a 2013 juntamente a geração estimada do ano de 2020.

Tabela 11: Dados da geração de resíduos em BH/MG

Ano	População	Quantidade total de resíduos	Quantidade total de resíduos	per capita
	Habitantes	(t/ano)	(t/d)	(kg/hab x d)
2010	2.375.151	632.887,74	1733,9	0,73
2011	2.385.640	648.730,83	1777,3	0,745
2012	2.395.785	672.627,19	1842,8	0,769
2013	2.479.165	672.842,91	1843,4	0,744
2020	2.530.701	766.550,00	2100,0	0,830

Fonte: IBGE (2010); SLU (2015); IBGE (2020); SLU (2020)

Fonte: Viegas, 2022

Os dados da composição gravimétrica do RSU da cidade, mostrados na Tabela 12, demonstram que tem havido uma significativa redução do percentual de matéria orgânica ao longo das últimas décadas com variações importantes nas quantidades de materiais recicláveis como plástico, o papel e de folhagens entre as décadas de 1970 a 2.000.

Tabela 12: Composição Gravimétrica do RSU de BH

Parâmetro	Ano de Realização do Estudo (% peso úmido)				
	1972 ⁽¹⁾	1985 ⁽¹⁾	1991 ⁽¹⁾	1995 ⁽²⁾	2004 ⁽³⁾
Papel	16,77	13,44	10,7	8,11	8,39
Papelão	-	2,43	2,8	3,3	1,13
Vidro	2,07	1,48	2,22	2,39	2,85
Madeira	0,93	0,97	0,56	0,53	0,99
Metal ferroso	-	2,3	2,5	2,26	1,75
Metal não ferroso	3,32	-	0,2	0,38	0,54
Plástico	1,9	4,92	6,5	11,27	10,88
Trapo	2,19	2,94	1,5	2,27	2,45
Couro	0,28	1,42	0,2	0,26	0,21
Folhagem	-	6,53	5,4	2,04	9,05
Borracha	0,09	1,56	0,42	0,27	0,39
Animal	-	0,18	-	-	-
Osso	0,11	-	-	0,07	-
Cerâmica	0,38	-	0,15	-	0,3
Alimento	-	8,94	-	-	-
Matéria orgânica putrescível	69,88	52,89	64,4	65,4	52,54

Fonte: Viegas, 2022

Belo Horizonte tem apresentado índices de matéria orgânica e materiais recicláveis, 48% e 32% respectivamente, relativamente compatíveis se comparado ao de outras cidades brasileiras ocupando uma posição intermediária no quadro geral dos compostos orgânicos e recicláveis em relação a outras capitais, como demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13: Composição Gravimétrica e PIB das capitais

Capital	PIB per capita	Matéria Orgânica	Recicláveis
São Paulo/SP	R\$ 60.750,09	51,23%	34,53%
Manaus/AM	R\$ 41.345,11	45,20%	43,00%
Brasília/DF	R\$ 87.016,16	48,34%	22,99%
Belo Horizonte/MG	R\$ 38.670,40	48,26%	32,47%
Porto Alegre/RS	R\$ 51.116,72	61,39%	21,38%
Recife/PE	R\$ 33.826,84	35,83%	37,11%

Fonte: Viegas, 2022

Do total de material coletado, a cidade de Belo Horizonte atualmente realiza a recuperação e separação média de 32% de material reciclável que são direcionados para os centros e galpões autorizados para o trabalho das cooperativas. A Tabela 14 apresenta os dados por região da cidade e a Tabela 15 demonstra a evolução desde 1972 até o ano de 2.004.

Tabela 14: Análise percentual estatística de recicláveis

<i>RA</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Venda Nova	30,77	30,33	4,23	23,28	37,49
Leste	33,77	33,97	4,25	26,97	39,7
Pampulha	32,75	31,43	4,48	27,31	42,5
Norte	29,67	30,64	4,69	19,77	37,76
Nordeste	32,22	30,96	3,56	27,68	38,17
Centro-Sul	37,04	38,14	4,44	30,62	42,46
Barreiro	30,47	29,63	4,35	22,98	37,65
Noroeste	33,47	35,09	6,01	20,17	41,16
Oeste	32,06	32,67	5,49	24,57	41,78
Belo Horizonte	32,47	32,18	4,93	19,77	42,5

Fonte: Viegas, 2022

Tabela 15: Comparação com estudos anteriores de composição dos resíduos em BH

<i>Ano</i>	<i>Matéria Orgânica</i>	<i>Papel/Papelão</i>	<i>Plástico</i>	<i>Vidro</i>	<i>Metais</i>	<i>Outros</i>
1972	69,88%	16,77%	1,90%	2,07%	3,32%	6,06%
1985	68,54%	15,87%	4,92%	1,48%	2,30%	6,89%
1991	69,80%	13,50%	6,50%	2,22%	2,70%	5,28%
1995	67,44%	11,41%	11,27%	2,39%	2,64%	4,85%
2004	61,59%	9,52%	10,88%	2,85%	2,29%	12,87%
2011 a 2021	48,34%	13,69%	11,97%	3,86%	3,00%	19,08%

Fonte: PBH (2022)

Fonte: Viegas, 2022

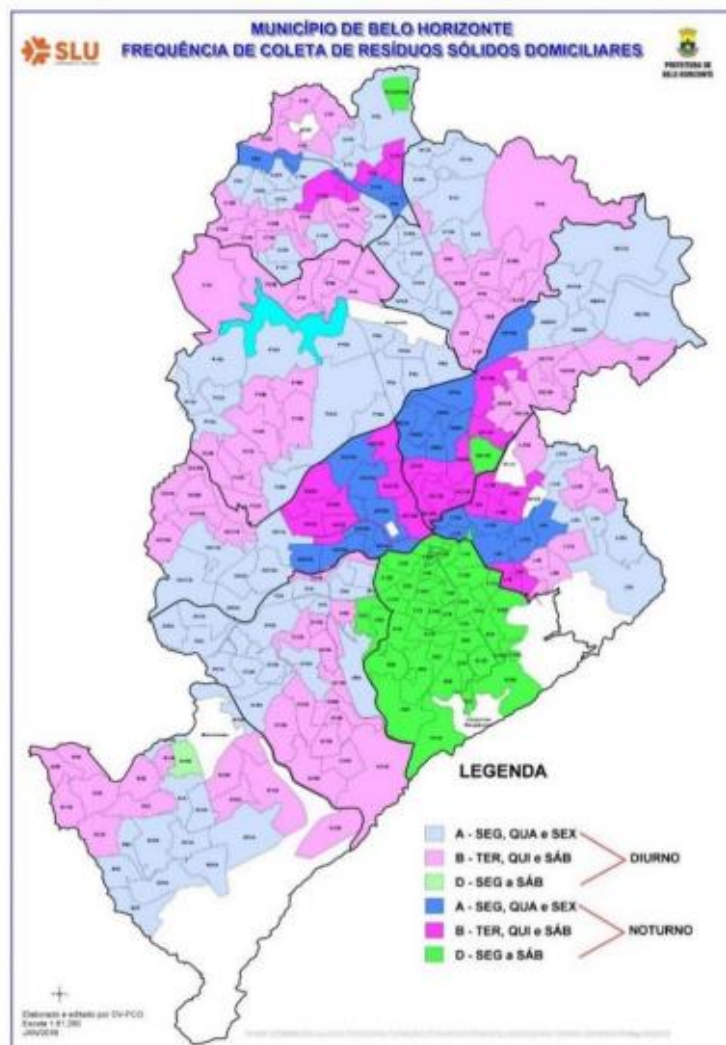
Considerando que apenas 53 dos 487 bairros do município são atendidos pela coleta seletiva, a maioria dos resíduos recicláveis é encaminhada diretamente para o aterro sanitário (PBH, 2019). A ampliação desse atendimento é de grande importância pois além de gerar valor econômico, causa menor impacto ao meio ambiente. Além do aumento do atendimento feito pela prefeitura, o incentivo e apoio às associações e cooperativas de catadores também é importante, porque são gerados novos empregos e renda com a comercialização desses materiais (Viegas, 2022).

4.3 Dinâmicas do processo de reciclagem na cidade

O serviço de limpeza urbana abrange 9 regionais de Belo Horizonte realizando a coleta do resíduo doméstico (RDO), a coleta do lixo nas vias públicas e ainda os resíduos sólidos de pequenos volumes (RSPV). A coleta seletiva de recicláveis Porta a Porta abrange 56 bairros da capital com periodicidade semanal e a coleta especializada em empreendimentos é determinada mediante parcerias com locais que geram um volume de

RSU considerável para a atuação dos catadores e das cooperativas. A Figura 11 apresenta a frequência da coleta nos diferentes bairros da cidade.

Figura 11: Frequência de coleta domiciliar porta a porta em áreas de urbanização



Fonte: Viegas, 2022

Na figura 12, os caminhões com capacidade para transportar 3 toneladas de material operam no traslado do resíduo para as cooperativas e são rastreados por GPS.

Figura 12: Caminhões de coleta do RSU em Belo Horizonte



Fonte: Próprio autor

O gerenciamento das atividades de coleta, transporte, do transbordo, triagem, prensa, processos de reciclagem e reutilização, na compostagem, no aterramento, no descarte de rejeitos e dos espaços clandestinos de queima de materiais torna o sistema complexo que exige coordenação e a participação ativa dos agentes públicos e privados na organização do setor e nos trabalhos de conscientização da população quanto ao correto destino dos resíduos. A prefeitura de Belo Horizonte, por meio Superintendência de Limpeza Urbana incentiva o serviço de coleta seletiva e paga para as cooperativas um valor com base na tonelada mensal do material coletado do modelo Porta a Porta e Ponto a Ponto nos bairros. A meta de quantidade de material estabelecido pela prefeitura de BH é de 100 toneladas por mês abrangendo todos os tipos de resíduos recicláveis, sendo que a média de produção de uma das cooperativas atualmente aproxima-se de 70 toneladas/mês. O departamento operacional da instituição realiza o serviço de limpeza urbana convencional e a coleta seletiva de materiais recicláveis (P, M, P, V). A conscientização da população para auxiliar na triagem do lixo desde o ponto de geração ainda é muito incipiente e nos locais determinados do programa coleta Ponto a Ponto, o material é descartado de forma incorreta, contendo orgânicos que atrapalha o processo de triagem nas cooperativas. A prefeitura remunera os parceiros das cooperativas pelas atividades de recebimento do volume e tipo de material entregue nos galpões (R\$/ton) e pelo trabalho que as cooperativas realizam de conscientização dos moradores sobre a coleta seletiva. Recentemente ficou estabelecido que a autarquia também irá remunerá-los pelos serviços de triagem do material executado nas dependências do galpão.

Um dos atores entrevistados da cooperativa da região norte da cidade, no bairro Pampulha, lidera e administra as atividades do galpão de 1.500 m² da coleta seletiva da

região em parceria com a Prefeitura da cidade. A cooperativa faz parte de uma das duas grandes redes locais de cooperativas (Redesol e Cataunidos) devidamente organizadas e estabelecidas por meio de regimentos internos e formada por cooperados que trabalham no recebimento, acomodação, triagem e pesagem dos materiais em fardos. Os resíduos da coleta seletiva, como papel, metal, plástico, vidro (P, M, P, V), isopor, óleo usado e, em até alguns casos, os bens inservíveis como móveis e cadeiras (URPV), representam hoje no máximo 5% de todo o RSU coletado e BH. Esses materiais são recolhidos pelos caminhões da prefeitura ou da própria cooperativa em determinados bairros, distritos e locais parceiros de grande geração e que seguem para os diferentes galpões das 6 cooperativas cadastradas pela prefeitura para a correta triagem e processamento dos resíduos. Nesses espaços acontecem a devida separação do material em “bags” de forma basicamente manual que depois são prensados mecanicamente e registrados os pesos em um software com a identificação de cada funcionário responsável pela produção. Em seguida, esses fardos prensados, figuras 13 e 14, recebem uma marcação numérica para sua própria identificação e registro no sistema afim de que haja, ao final do mês, uma contabilização e o pagamento específico da produção de cada cooperado.

Figura 13: Prensa dos materiais recicláveis da cooperativa



Fonte: Próprio autor

Figura 14: Fardos e bags de recicláveis



Fonte: Próprio autor

Cada cooperativa, disponibiliza um caminhão de coleta, um motorista e dois ajudantes para efetuarem o trabalho semanal nas regiões determinadas no modelo Porta a Porta ou Ponto a Ponto. O modelo Porta a Porta engloba a coleta seletiva dos materiais (P, M, P, V) nos bairros e ruas previamente determinados pelo planejamento da Superintendência de Limpeza Urbana de BH (SLU) e o modelo Ponto a Ponto são as coletas realizadas em pontos específicos na cidade em que existem os containers próprios da prefeitura para a acomodação e a separação dos materiais pela própria população de forma voluntária.

Figura 15: Containers de material reciclável



Fonte: Próprio autor

Dentre os materiais recicláveis coletados e triados, os papéis, metais, plástico e vidros, ainda podem ser segregados em subgrupos de tipologias e características diferentes de forma a serem prensados separadamente. Esses materiais são vendidos a valores específicos no mercado aos intermediários que, por sua vez, na logística reversa repassam para as indústrias e empresas que os irão reciclar ou reutilizar no processo da economia circular. A Tabela 16 mostra a produção média de cada cooperativa.

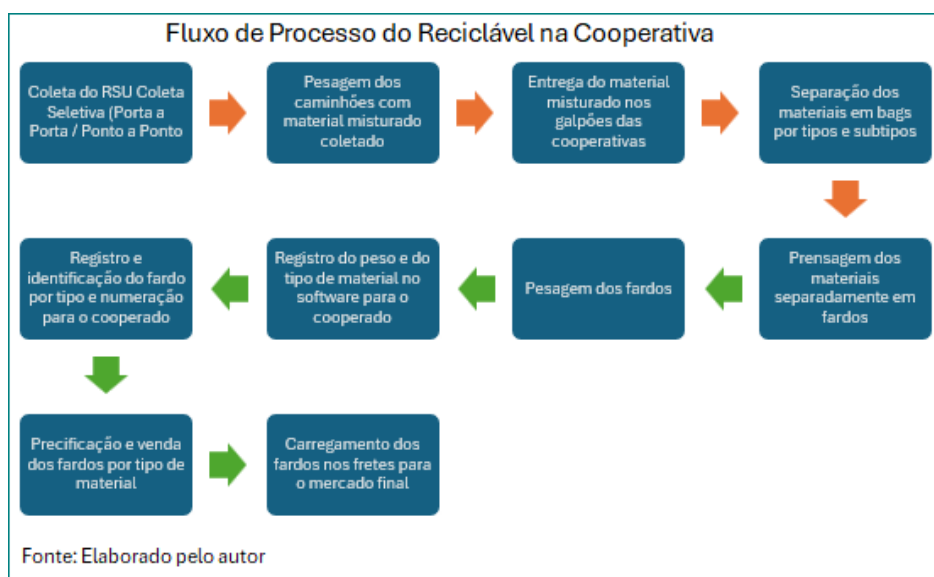
Tabela 16: Dados médios de produção da cooperativa

Produção Média da Cooperativa na Coleta Seletiva		
Nº máximo de cooperados	20	Valor médio (R\$/kg)
Produção/cooperado	2 - 8 ton/mês	-
Produção média/cooperado	2 - 3 ton/mês	-
Rendimento médio mensal/cooperado	R\$ 1.500 - R\$2.500	-
Produção total média Cooperativa	100 - 120 ton/mês	-
% média de papel	55%	0,55 a 1,50
% médio de metal	5%	0,60 a 1,15
% médio de plástico	10%	1 a 3
% médio de vidro	30%	0,15 a 0,25
Média de Rejeito	20 - 30%	-

Fonte: Próprio autor

A produção do material triado de cada cooperado é metrificada por meio da codificação dos fardos e das pesagens registradas no software. Assim, o colaborador recebe o pagamento pela produção total mensal sendo que 80% do valor é destinado ao cooperado como pagamento pela produção, acrescido de outros benefícios, e 20% é recolhido para a gestão administrativa e pagamento de despesas operacionais da cooperativa. A Figura 16 apresenta o processo completo na cooperativa. De todo o material reciclável recebido e triado nos galpões, cerca de 30% em média é considerado como rejeito e destinado para o aterro sanitário. Foi mencionado pela gestora que a tecnologia de incineração e de produção de biogás com a consequente redução do modelo de coleta seletiva em curso podem prejudicar o trabalho social dos catadores reduzindo a longevidade de operação dessas áreas.

Figura 16: Fluxo de processo do reciclável na cooperativa



Outra cooperativa autorizada pela prefeitura para prestar serviços de coleta seletiva, a Coopersol Leste, apresenta a estrutura física do galpão e o layout desses grandes espaços sem a lógica operacional adequada para a condução das atividades de modo funcional e eficiente. Esses galpões não foram projetados adequadamente para o exercício daquelas funções e a efetiva colocação dos maquinários de trabalho prejudica o alcance da máxima produtividade em todo o processo da reciclagem. As Figuras 17, 18 e 19 mostram a estrutura interna dos galpões onde ocorrem a triagem dos materiais.

Figura 17: Separação de recicláveis na cooperativa de BH



Fonte: Próprio autor

Figura 18: Área interna do galpão



Fonte: Próprio autor

Figura 19: Esteira de triagem de recicláveis



Fonte: Próprio autor

A disputa pelo mercado comprador dos insumos e as parcerias criadas para se destinar o material coletado também acontece de forma separada pelas cooperativas, o que gera a dificuldade de se contabilizar o montante global de resíduo triado por cada tipo de material (P,M,P,V,isopor) a fim de se estabelecer uma vantagem competitiva para a distribuição, precificação e ampliação da entrega para o mercado consumidor.

Há iniciativas rudimentares de desenvolvimento de parcerias de forma pontual com núcleos em bairros específicos da cidade para a coleta de materiais orgânicos para um processo de produção de compostagem no galpão visitado.

Na Coopersol, 30% do material coletado nos pontos específicos de destinação é considerado como rejeito devido a quantidade de resíduos misturados existentes nos contêineres que deveriam ser destinados a resíduos recicláveis. Muitas vezes também podem ser classificados como rejeitos por ainda não haver mercados para negociação ou destinação para sua utilização e assim são transportados para o aterro sanitário metropolitano em operação. O material reciclável aproveitável, é triado e separado em bags conforme o seu tipo específico e são prensados em fardos com peso variando entre 100kg e 500kg. Em seguida são destinados aos fretes que tem a capacidade de levar aproximadamente 50 fardos mistos por carregamento.

Quando a Cooperativa recolhe o material dos catadores autônomos nas ruas, o valor R\$/Kg do material sofre um deságio de 35% com o objetivo de ser aplicado para custear as despesas administrativas e de frete do galpão. O RSU, coletado no modelo convencional semanalmente nas residências, apresenta uma mistura muito grande de material orgânico e recicláveis que, à medida que são transportados para o aterro sanitário, sofrem um processo básico de triagem para evitar que sejam aterrados os materiais recicláveis que podem ser posteriormente aproveitados pelas cooperativas e na venda para o mercado. A cooperativa visitada possui 4 máquinas de prensa, 1 máquina picador de papel, 3 balanças pequenas de 1.000kg, 1 balança rodoviária e 2 esteiras de 10m e 15m de comprimento. Entretanto, não existe um padrão de estrutura de operação entre as diferentes cooperativas do setor.

A venda dos recicláveis em maior volume ocorre por meio de parcerias que as cooperativas estabelecem com atravessadores que compram os materiais recicláveis triados e os revendem para as indústrias atendendo aos preceitos estabelecidos na legislação e pelas orientações da economia circular. A venda de forma direta para os consumidores finais ocorre com a negociação do valor do produto e do frete logístico de recolhimento e entrega. Existem também outros materiais em que não existe localmente um mercado de compra e revenda sendo assim tratados como rejeito e destinados diretamente para o aterro sanitário da cidade (bandejas de ovo, plásticos laminados de chips BOPP, papel de bolo, copo descartável e pedaços de vidros sujos). Esses materiais tratados como rejeitos são destinados aos aterros sanitários locais não sendo devidamente reaproveitados pelas tecnologias de WtE como a de incineração.

A abertura de mercado para o acesso direto as empresas compradoras de resíduos que atuam no mercado de logística reversa depende da aglutinação de volumes superiores aos que a cooperativa consegue produzir mensalmente e por isso acabam destinando os resíduos

fardados e pesados para os intermediários do setor. O mercado de compra desses materiais é bastante aquecido e, segundo relatos, haveria espaço para outras cooperativas atuarem também em conjunto possibilitando a ampliação da coleta em outros pontos da cidade que atualmente não são atendidos. A negociação do valor de cada material e do frete é estabelecido com cada cliente final conforme a sua estrutura de armazenamento, disponibilidade de veículo para transporte e o valor praticado no mercado em cada época do ano de forma dinâmica.

A vista técnica realizada no aterro sanitário do Centro de Tratamento de Resíduo Sólido CTRS BR040 em Belo Horizonte foi realizada com o gestor operacional da unidade. Foram apresentadas as principais atividades desenvolvidas atualmente no local pois o aterro já não se encontra mais em total operação pois atingiu sua cota máxima de aterramento com 65m de altura das camadas estratificadas de cobertura de lixo. O CTRS BR040 é o local onde se realiza a compostagem com os materiais orgânicos das podas das árvores para atender as demandas de utilização da própria prefeitura na aplicação em jardins e espaços verdes.

No local são processados atualmente os materiais orgânicos, provenientes de podas de árvores da cidade e de restaurantes populares da prefeitura na área de compostagem, recebem os resíduos da construção civil (RCC), contabilizando 800 toneladas/mês, que são transformados em diversos outros subprodutos de gravimetria diversificada para atender as demandas da prefeitura na construção civil e, ainda, a biomassa aterrada no local que gera uma pequena quantidade de chorume e biogás. O biogás processado na usina está em níveis cada vez mais baixos, mas ainda injeta energia na rede da concessionária que é redistribuída no mercado local. A usina contém 2 queimadores ou flares em atividades. Atualmente, há outro aterro sanitário em operação na região metropolitana da cidade, o aterro CTRS Macaúbas, com geração média de energia mais expressiva atingindo a média de 6.000 kWh/mês de energia, gerado por 7 geradores de 1.4 MWh, sendo injetada e comercializada na rede de distribuição da CEMIG.

O volume médio de RSU registrado que é destinado para o aterro de Macaúbas é de 2.200 toneladas/mês, com 600 a 1.000 caminhões de material coletado por dia. A triagem básica separa o material reciclável para retornar para as cooperativas e outra grande parte do volume é aterrado, gerando chorume e biogás. Já no aterro CTRS da BR040, chegam 2 caminhões carregando entre 6 e 8 toneladas de matéria orgânica de podas por dia para alimentar o processo da compostagem. Isso é fundamental para evitar que todo esse material

siga para o aterro sanitário para ser aterrado de forma indiscriminada e sem a triagem dos materiais recicláveis.

Como a área de aterramento dos resíduos sólidos da coleta urbana residencial e comercial não está mais em operação, foi desenvolvido um projeto de plano de manejo para a construção de um parque no local.

O chorume coletado é descartado no curso d'água que segue para a Estação de Tratamento de Esgoto - ETE da Companhia de Saneamento de Minas Gerais - Copasa/MG e não está sendo tratado localmente no CTRSB040.

A Associação Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (ANCAT) organiza, orienta e trabalha para defender os interesses dos catadores de recicláveis no Brasil sendo que, atualmente, desenvolve trabalhos com aproximadamente 512 cooperativas, com 19.105 catadores envolvidos em 269 cidades brasileiras já tendo recuperado quase 590.000 toneladas de materiais que poderiam haver sido depositados em lixões ou mesmo direcionados aos aterros sanitários. Para se associar a ANCAT, a cooperativa deve ter uma produção mensal próxima de 70 toneladas de materiais recicláveis triados. Existem também, aquelas empresas que são parceiras das cooperativas e estabelecem contratos entre si para que seja realizada a destinação correta dos resíduos dos geradores para as cooperativas interessadas no recolhimento na região em que operam.

O objetivo de mudar a percepção da sociedade, enraizada em um conceito de se enxergar os materiais descartados como lixo, em prol da compreensão de que recursos ainda podem ser transformados para se gerar valor e novos produtos no modelo da economia circular é uma das grandes responsabilidades de todo o setor.

4.4 Análise situacional e principais desafios

Por meio das visitas nos agentes envolvidos na gestão do RSU, observa-se que a atividade tem a sua orientação e organização determinada essencialmente pela prefeitura da cidade demonstrando a estreita relação entre a necessidade de se integrar os trabalhos entre as entidades públicas e privadas na melhor condução dos processos de gestão do RSU. A máquina pública tem papel fundamental na estruturação do desenvolvimento e fomento das políticas, planos e diretrizes dos programas para nortear as operações dos demais agentes na

gestão dos resíduos sólidos urbanos, seja por meio da formação de Parcerias Público-Privado (PPP's), na definição do arcabouço legislativo ou pela criação de empresas e cooperativas que atuam nas diversas fases do processo de tratamento do resíduo.

O nível de abrangência e capilaridade alcançado pela coleta convencional e seletiva dos diversos tipos de resíduos sólidos urbanos é de fundamental importância em toda a cadeia produtiva pois irá possibilitar a sua melhor destinação dentro dos processos de transformação biofísico-químico dos materiais podendo ser transformados em novos produtos para inserção no mercado de diversas formas. Nesse sentido, estruturar adequadamente o posicionamento dos atores locais e promover os devidos investimentos nas estruturas físicas de trabalho e dos arranjos produtivos locais envolvendo o gerenciamento das atividades é essencial para se extrair o máximo benefício dos resíduos descartados. Estabelecer o quantitativo correto de pessoal em operação nas ruas e nos galpões, a quantidade de veículos na coleta, a estruturação dos pontos de recebimento, manejo e áreas de transbordo, juntamente com o aumento dos pontos de coleta seletiva com abrangência e periodicidade de recolhimento adequados, interfere fortemente na qualidade do tratamento dos resíduos devendo ser transformados de forma eficiente e mercadologicamente renegociados.

Produtos da coleta seletiva necessitam ser mais bem triados e para isso um trabalho eficaz de conscientização e penalidades para a sociedade é essencial para se alcançar volumes e maior qualidade na coleta dos materiais. Definir metas máximas para a geração dos rejeitos e criar estratégias para a sua melhor utilização e reaproveitamento criando mecanismos para novas parcerias com o mercado consumidor a nível regional é fundamental. Reunindo maior volume de resíduos segregados por grupos e subgrupos permite expandir a abrangência do mercado consumidor de recicláveis a nível regional e cria alternativas diversificadas de investimentos em tecnologias para o tratamento dos resíduos de forma diferente para cada subproduto, o que estimula e fortalece o elo de toda a cadeia produtiva de gestão do RSU sob os aspectos econômicos, sociais, físicos, de gestão, de meio ambiente e de saúde pública.

Aliado à urgente necessidade de se estabelecer programas duradouros de conscientização da sociedade sobre como auxiliar e proceder em parceria com o serviço público de coleta de resíduos, tornar o sistema mais efetivo para todos os atores significa desenvolver ferramentas e metodologias de trabalhos integrados e juntos promover o desenvolvimento da cadeia produtiva de gestão do RSU afim de tornar os empreendimentos

financeiramente e socialmente saudáveis para os investidores, empresários, órgãos públicos, trabalhadores, cooperativas e para sociedade. Acrescentando ainda a grande necessidade de se desenvolver estratégias de aplicação de diferentes tecnologias de WtE localmente adequadas para o melhor aproveitamento das características bioquímicas dos resíduos.

Os principais desafios relatados pelos gestores do setor retratam temas referente a organização da estrutura de gestão como também envolve deficiências na estrutura física de trabalho e disponibilidade de recursos para investimentos. Dentre eles pode-se citar (1) Inexistência de um centro de triagem conjunto com outras cooperativas para aumento do volume do material a ser vendido para o mercado final; (2) Falta de comprometimento dos cooperados para assumirem posições de liderança e engajamento na gestão das cooperativas com empreendedorismo; (3) Flutuação dos valores dos materiais no mercado ocasionando evasão dos cooperados para as atividades; (4) Necessidade de desenvolvimento de um modelo de multas e penalizações para os locais que não contribuírem para a separação e destinação correta do lixo associado a projetos de conscientização nos bairros; (5) Galpão com infraestrutura e layout de produção inadequado para recebimento, recolhimento e produção dos materiais recicláveis de modo a aumentar a produtividade; (7) Falta de incentivo de governo; (8) Bags e caminhões inadequados ou ruins; (9) Necessário a instalação das esteiras e aplicação da tecnologia para triagem associada a atividade manual; (10) Aumentar o número de cooperados para atuar nas cooperativas de reciclagem; (11) Modelos de gestão ainda amadores e pouco profissionais; (12) Desenvolver na sociedade a consciência para compreender a função do resíduo sólido urbano como recurso, matéria prima e dinheiro; (13) Material reciclável recolhido nos locais determinados com Ponto a Ponto onde estão disponibilizados os containers específicos de cada produto recebem muitos resíduos misturados e dificultam o processo de triagem e desenvolvimento do programa na cidade; (14) Conflitos entre as cooperativas, entidades públicas e o segmento empresarial quanto a iniciativas que possam impactar socialmente as atividades relacionados à coleta seletiva e atuação dos catadores na cidade; (15) Processo de descarregamento dos caminhões inadequado e o espaço destinado para a triagem, prensa, estoque e embarque dos fardos para o frete com layout impróprio.

5. CONCLUSÕES

A geração de resíduos sólidos urbanos acompanha a humanidade desde seus primórdios e nota-se que o volume de geração tem aumentado bem como suas características. Conforme a evolução tecnológica, o crescimento populacional, o aumento do consumo de materiais na sociedade e o aumento do poder aquisitivo, percebe-se que países e regiões em diferentes estágios econômicos apresentam comportamentos de consumo variados gerando rejeitos muito diferentes.

A maturidade social sobre a determinação de aspectos regulatórios no que tange os debates para o desenvolvimento do setor de *Waste to Energy* auxilia o direcionamento das iniciativas para a gestão dos resíduos sólidos e na aplicação de investimentos que impactam as localidades nas esferas social, cultural, econômico, financeiro, ambiental, tecnológico e envolvem diversos atores locais para a participação em um setor de muita complexidade.

Promover a recuperação energética de materiais exige uma cadeia produtiva disposta a negociar possibilidades de aplicações tecnológicas complementares mediante o desenvolvimento de um trabalho conjunto na malha social reunindo o poder público e a iniciativa privada por meio de parcerias com a sociedade organizada para alcançar objetivos comuns relacionados a redução da geração de resíduos, de gases de efeito estufa e para o estímulo à recuperação energética dos materiais fortalecendo a economia circular.

A definição das melhores tecnologias a serem aplicadas mediante esse arcabouço social mais consciente e de entidades públicas e empresas operando de forma alinhada tende a gerar benefícios significativos e localizados nas cidades devendo ser tratadas de forma complementar ao invés de serem vistas como concorrentes e competidoras entre si.

A cidade de Belo Horizonte ainda enfrenta enormes desafios para se criar um melhor cenário de gerenciamento e aproveitamentos dos recursos na disposição final do RSU que ainda ocorre, em grande medida, de forma imprópria e com baixo estímulo a conscientização social sobre o valor energético dos resíduos. A aplicação das tecnologias de *Waste to Energy* ainda é um desafio para a gestão municipal pois a integração dos diferentes atores locais do setor aparenta ser frágil e há resistências manifestadas pelos grupos de cooperativas da coleta seletiva principalmente sob o aspecto dos impactos sociais e ambientais mediante a possibilidade de implementação da tecnologia de tratamento térmico dos resíduos. Sustentado ainda por uma infraestrutura de coleta insuficiente e precária, com baixo volume total coletado de recicláveis restringido em uma área reduzida da cidade, restrito a processos

de tratamento e aplicação de tecnologias complementares e, ainda, incipiente parceria público privada na condução das atividades de gerenciamento dos resíduos.

É sugerido que os temas relacionados à evolução do *Waste to Energy* na cidade de Belo Horizonte possam ser estudados associados as estratégias de: (1) Atuação conjunta entre as atividades de coleta, programas de reciclagem e a introdução de plantas de *Waste to Energy* de incineração mediante os conflitos que são gerados entre os atores envolvidos; (2) Formação de cluster regionais que possam garantir o abastecimento de quantidades específicas de resíduos com estudos de longo prazo para a viabilidade econômica dos empreendimentos; (3) Estudos de rede quanto a qualidade de energia injetada e a gestão de despacho de energia considerando a viabilidade econômica das plantas térmicas de operar 24/7 em praticamente todos os dias do ano; (4) Estratégias de formação de cluster de operação pelas cooperativas visando acumular maiores quantidades de resíduos, reduzir custos operacionais, aumentar volumes de vendas de recicláveis e a quantidade de rejeitos para estudos de WtE; (5) Estudos de complementariedade na aplicação de tecnologias na gestão dos resíduos na cidade; (6) Estudos sobre o mercado existente para consumo e aquisição dos subprodutos gerados pelas tecnologias de WtE entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil, 2022.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Disponível em <https://www.abrema.org.br/2024/03/04/como-evolui-o-cenario-de-rsu-no-brasil/>. Acesso em junho de 2024.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Disponível online: <https://www.abrema.org.br/>. Acessado em junho de 2024.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2023.

Albuquerque, M. S.; Moreira, Y.W.N.; Figueiredo, B.L.; Paiva, B.K.V.; Stefanutti, R.; Silva, F.J.A. Waste to Energy: potencialidade e contextualização da sua aplicação no Brasil. Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales, 2024.

Aremu, A.S.; Ganiyu, H. Waste to Energy: Developing Countries' Perspective. Waste Management and Resource Efficiency, 2019

BRASIL, Lei n. 12.305. Dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares, 2022.

Confederation of European Waste to Energy Plants – CEWEP. Waste to Energy Sustainability Roadmap -Towards 2035, 2019.

Confederation of European Waste to Energy Plants – CEWEP. Disponível online: <https://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>. Acesso em maio de 2024.

Dadario, N.; Filho, L.R.A.G.; Cremasco, C. P.; Santos, F.A.; Rizk, M.C.; Neto, M.M. Waste-to-Energy Recovery from Municipal Solid Waste: Global Scenario and Prospects of Mass Burning Technology in Brazil, 2023.

Dadario, N.; Neto, M.M.; Santos, F.A.; Cremasco, C. P. Análise sintética da aplicação da técnica Waste-to-Energy (Wte) e das legislações brasileiras pertinentes, 2021.

Dadario, N.; Neto, M.M.; Santos, F.A.; Cremasco, C.P. Análise sintética da aplicação da técnica Waste to Energy (WTE) e das legislações pertinentes.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2023, 2024.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> com acesso em 20/10/24.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. National Energy Balance. 2021. Available online: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em junho 2024.

Federação de Energia Ambiental e Serviços Público de Água. UTILITALIA, 2020. White Paper on Municipal Waste Inineration, 2020.

Galavote, T.; Cerqueira, A.; Alves, R.; Ramalho, J.; Yamane, L.; Siman, R. Energy Recovery Technologies from Municipal Solid Waste: Enhancing solid waste Brazilian Policy, 2022.

Intenational Solid Waste Association – ISWA. White Book on Energy-from-Waste (EfW) Technologies, 2022.

Intenational Solid Waste Association – ISWA. White Paper Alternative Waste Conversion Technology, 2013.

Kaza S.; Lisa, Y.; Perinaz, B.T.; Frank, V. W. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series, 2018.

Kaza, S.; Tata, P B. Decision Maker`s Guide for Solid Waste Management Technologies. World Bank Group. Urban Development Series Knowledge Papers, 2018.

Lim, S.; Asef, H. A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management, 2017.

Mukherjee, J.; Denney, E.G.; Mbonimpa, J.; Slagley, R.; Bhowmik, C. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2020.

Mutz, D.; Hengevoss, D.; Hugi, C.; Gross, T. Opções de Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento, 2017.

ORIZONVR Valorização de Resíduos. Disponível online: <https://orizonvr.com.br/o-que-e-uma-unidade-de-recuperacao-energetica/>. Acesso em maio de 2024.

PBH. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos sólidos de Belo Horizonte. PMGIRS, 2017.

Saveyn, H.; Eder, P.; Ramsay, M.; Thonier, G.; Warren, K.; Hestin, M. Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy. European Comission, 2016.

Tisi, Y.S.A.B. Waste-to-Energy: Recuperação energética como forma ambientalmente adequada de destinação dos residuos sólidos. Synergia: Rio de Janeiro, Brazil, 2019.

Tisi, Y.S.A.B.; Matos, F.A.; Carneiro, M.L.N.M. Development of waste to energy through integrated sustainable waste management:the case of ABREN WtERT Brazil towards changing status quo in Brazil, 2023.

Tsui, T.H.; Wong, J.W.C.; A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management, 2019.

United Nation Environment Program UNEP (2019). Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making, 2019.

United States Environmental Protection Agency (EPA). Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW). 2017. Disponível online <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw#01> com acesso em maio de 2024.

United States Environmental Protection EPA. Disponível online em <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw> com acesso em junho de 2024.

Viegas, A.C.G. Análise da evolução temporal da gravimetria dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Belo Horizonte, 2022.

Vilas Boas da Silva, L. J.; Santos, I. F. S.; Mensah, J. H. R.; Gonçalves, A. T. T.; Barros, R.M. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential, 2019.

World Bank Group. Bridging the Gap in Solid Waste Management Governance Requirements for Results, 2021.

World Bank Group. World Energy Resources - Waste to Energy. World Energy Council, 2016.