



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SOROCABA

PEDRO PAULO RODRIGUES PARATELLI

**Tecnologias Waste-To-Energy: Conceito e Aplicação no Cenário
Brasileiro de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.**

Sorocaba

2022

PEDRO PAULO RODRIGUES PARATELLI

**Tecnologias Waste-To-Energy: Conceito e Aplicação no Cenário
Brasileiro de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciência e
Tecnologia de Sorocaba, Universidade
Estadual Paulista (UNESP), como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini
Mancini

Sorocaba

2022

P Paratelli, Pedro Paulo Rodrigues
 Tecnologias Waste-To-Energy: Conceito e Aplicação no
 Cenário Brasileiro de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. /
 Pedro Paulo Rodrigues Paratelli. -- Sorocaba, 2022
 55 f. : il., tabs.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
 Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto
 de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

 1. Engenharia Ambiental. 2. Gestão de Resíduos. 3.
 Recuperação

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a todos os meus santos protetores, responsáveis pela manutenção da minha fé e por me proverem o livre-arbítrio de escolher o rumo que eu quero dar a minha vida.

Em segundo e de suma importância, gostaria de agradecer meu pai Luiz Geraldo, minha mãe Maria Aparecida e minha irmã Luiza Helena por me proverem condições de ter estudado no Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, bem como por serem meu porto seguro para todas as vezes que precisei de auxílio. Sem vocês nada disso seria possível.

À minha amiga e companheira Gabriella Veiga, deixo um agradecimento especial por todo auxílio e parceria de sempre. Espero que esse fechamento perdure por anos.

Gostaria de agradecer também aos amigos que fiz durante o tempo em morei na cidade de Sorocaba, em especial aos amigos da República Kana Sutra, casa onde passei a maior parte do meu tempo e tive aprendizados que me servirão para o restante da vida.

Ao corpo docente e administrativo que contribuíram para minha formação deixo aqui o meu muito obrigado, é de grande valia o conhecimento técnico e orientação institucional que vocês transmitiram e eu tenho certeza que será de extrema utilidade para os desafios que me aguardam no decorrer da minha caminhada profissional. Em especial, gostaria de deixar um agradecimento ao meu professor-orientador Dr. Sandro Donnini Mancini, que me guiou para conclusão deste presente trabalho.

Por fim deixo meu agradecimento à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como instituição, por ter me dado a oportunidade de vivenciar experiências enriquecedoras que contribuíram de forma majoritária para a composição da pessoa que eu sou. Muito obrigado UNESP e todos os seus colaboradores, da equipe de limpeza ao reitor do campus, todos foram essenciais para a minha formação.

RESUMO

Conforme o crescimento populacional em zonas urbanas está crescendo há também o crescimento do consumo de bens e serviços, o que aumenta a geração de resíduos. Esse crescimento somado a ascensão de pautas sustentáveis em discussões e acordos internacionais pressiona países a adotarem saídas alternativas para a destinação de resíduos. O presente trabalho elucida sobre as principais tecnologias de recuperação energética de resíduos associando as mesmas como uma alternativa aos desafios e obstáculos enfrentados pelo atual plano de gestão de resíduos sólidos brasileiro, focando em soluções que atendam questões ambientais, sociais e de governança (ESG). Dentre as tecnologias apresentadas, escolheu-se aquela que apresentasse o melhor balanço entre risco e eficiência, chegando à conclusão da escolha da tecnologia de combustão em grelha. Posteriormente foram apresentados os aspectos econômicos e pontos-chaves necessários para construção e operação de uma planta Waste-To-Energy e os resultados obtidos em um estudo de caso para a instalação de uma planta na região metropolitana de Buenos Aires, Argentina. A análise desses critérios possibilitou enxergar a necessidade do Brasil em se adequar a hierarquia de gestão de resíduos de forma mais criteriosa e estabeleceu os passos a serem tomados para que a mudança para tecnologias de processamento de RSU mais modernas e adequadas sejam, de fato, estabelecidas em território brasileiro.

Palavras-chave: Meio Ambiente. Gestão de Resíduos. Recuperação Energética. Resíduos Sólidos Urbanos.

Waste-To-Energy Technologies: Concept and Application in the Brazilian Scenario of Municipal Solid Waste Management.

ABSTRACT

As population growth in urban areas is increasing, so is the consumption of goods and services, which increases waste generation. This growth coupled with the rise of sustainable agendas in international discussions and agreements pressures countries to adopt alternative ways to dispose of waste. This paper elucidates the main technologies for waste energy recovery, associating them as an alternative to the challenges and obstacles faced by the current Brazilian solid waste management plan, focusing on solutions that address environmental, social and governance (ESG) issues. Among the technologies presented, the one that presented the best balance between risk and efficiency was chosen, reaching the conclusion of the choice of the grate combustion technology. Afterwards, the economical aspects and key points necessary for the construction and operation of a Waste-To-Energy plant were presented, as well as the results obtained in a case study for the installation of a plant in the metropolitan area of Buenos Aires, Argentina. The analysis of these criteria made it possible to see the need for Brazil to adapt to the waste management hierarchy in a more judicious manner and established the steps to be taken so that the change to more modern and adequate MSW processing technologies may, in fact, be established on Brazilian territory.

Key words: Environment. Waste Management. Waste-To-Energy. Municipal Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia da Gestão Sustentável de Resíduos; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	12
Figura 2 - Gráfico Comparativo das Taxas de Resíduos Reciclados, Recuperados Energeticamente e Aterrados, por País da União Europeia; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	13
Figura 3 - Taxas Regionais que compõe o Total Nacional de RSU Coletado; Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019	16
Figura 4 - Comparativo do Consumo de Energia entre 1971 e 2018; Fonte: Legal aspects of introducing waste-to-energy (WTE) technology in Sao Paulo State of Brazil: The case studies of URE Barueri and city of Sao Paulo	18
Figura 5 - Energia Consumida por Setor no Brasil	19
Figura 6 - Economia Circular da Gestão de Resíduos; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	21
Figura 7 - Elementos de Análise para Tomada de Decisões em Ações que Visam a Sustentabilidade; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	21
Figura 8 - Esquema de Planta WTE; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	24
Figura 9 - Esquema de Planta de Combustão em Grelha; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	25
Figura 10 - Esquema de Funcionamento da Planta WTE SEMASS em Rochester, Massachussets nos EUA; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	27
Figura 11 - Esquema de Tecnologia de Leito Fluidizado; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	28

Figura 12 - Esquema de Tratamento Mecânico Biológico; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	29
Figura 13 - Processo de Redução Direta; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	30
Figura 14 - Esquema do Processo Ebara de Leito Fluidizado; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing region	32
Figura 15 - Esquema de Tratamento por Combustão em Chama de Plasma; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	33
Figura 16 - Esquema de Processo de Pirólise; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	34
Figura 17 - Gráfico de Custo por Capacidade de Processamento de RSU; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	40
Figura 18 - Esquema de Planta de Combustão em Grelha; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	42
Figura 19 - Esquema de Câmara de Combustão; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens dos Aterros em Comparação com o processo Waste-To-Energy	23
Tabela 2 - Metodologia SWOT – Critérios Técnicos	35
Tabela 3 - Metodologia SWOT – Critérios Ambientais	36
Tabela 4 - Metodologia SWOT – Critérios Sociais	37
Tabela 5 - Metodologia SWOT – Critérios Financeiros	39
Tabela 6 - Tecnologias de Controle de Emissões	45

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	14
2.1.	Objetivo Geral.	14
2.2.	Objetivos Específicos.	14
3.	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1.	Cenário Brasileiro e Resíduo Sólido.....	15
3.2.	Energia e Economia Circular.....	17
3.3.	Recuperação Energética de RSU	22
3.3.1.	Tratamento Térmico	24
3.3.2.	Tecnologias de Gaseificação	29
3.3.3.	Pirólise de Resíduos Plásticos	33
4.	METODOLOGIA.....	35
4.1.	Planejamento e Construção de uma Planta WTE	40
4.2.	Planta de Combustão em Grelha	41
4.2.1.	Fosso de Resíduos.....	43
4.2.2.	Câmara de Combustão	43
4.2.3.	Recuperação de Energia.....	44
4.2.4.	Sistema de Controle de Emissões de Poluentes.....	44
4.2.5.	Cinza da Planta WTE	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1.	Aspectos Econômicos da Recuperação Energética de Resíduos.....	47
5.2.	Estudo de Caso – Barueri – SP, Brasil (URE).....	50
5.3.	Estudo de Caso – Buenos Aires, Argentina	50
5.2.1.	Dados sobre o país	50
5.2.2.	Capacidade da Planta	51

5.2.3. Local de Instalação	51
5.2.4. Custos Projetados	51
5.2.5. Conclusões.....	51
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos, bem como seus meios de disposição e tratamento final sempre estiveram a companhia do ser humano desde os primórdios da história, em que se há relato. A revolução industrial, dentro desta linha do tempo, foi um ponto importante para a história dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) uma vez que após ela foi notado uma considerável aceleração no consumo de bens, e geração correspondente de resíduos, levando as cidades a criarem aterros e incineradores, como solução a essa problemática que havia se instaurado. Contudo, a partir de meados do século XX, o que se viu foi o crescimento cada vez mais acelerado dessa geração de resíduos.

Metodologias e tecnologias, como design de produtos e embalagens para redução de rejeitos; reciclagem de materiais; compostagem do resíduo orgânico gerado; aproveitamento energético; e aterramento sanitário; foram medidas criadas como alternativa a esse problema que vem se agravando conforme avançamos no tempo.

Atualmente, sete bilhões de pessoas produzem cerca de 1,4 bilhão de toneladas de resíduo sólido urbano (RSU) por ano – quase 700 milhões gerados apenas pelos 30 países mais desenvolvidos - ou seja, cerca de 1,2Kg de resíduo gerado por dia por cada habitante do planeta terra. Segundo estudo realizado pelo Banco Mundial e pela Organização das Nações Unidas, em 2050, se nenhuma medida for tomada, haverá um aumento de 350% na geração de resíduos – KAZA, Silpa. YAO, Lisa. BHADA-TATA, Perinaz. VAN WOERDEN, Frank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank Publications, Dez 6, 2018. As previsões apontam para uma população de 9 bilhões de habitantes gerando cerca de 4 bilhões de RSU por ano.

No último Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, realizado pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), os dados, que fazem referência aos anos de 2018-2019, apontam que foram gerados 79 milhões de toneladas no ano, dos quais 92% foi coletado. Sendo assim, 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração. Desse montante coletado, 59.5% tiveram destinação adequada em aterros sanitários, ou seja, os restantes 29,5 milhões de toneladas

foram despejados inadequadamente em lixões ou aterros controlados que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteger a saúde das pessoas e meio ambiente contra danos e degradações.

No processo gestão sustentável integrada de resíduos (GSIR) existe uma hierarquia a ser seguida que estabelece a ordem de decisões a serem tomadas (Figura 1), começando antes de sequer ter o material a ser destinado em mãos. Dentro dessa separação por importância o sistema encontra um obstáculo presente até em países com bons percentuais de sustentabilidade: em determinado momento a separação do material na fonte se torna difícil e, por conseguinte, pouco rentável, uma vez que, a maior parte dos resíduos pós-reciclagem são compostos químicos orgânicos. Independente dos esforços e recursos despendidos em reciclagem, há certas propriedades de materiais e barreiras financeiras que limitam o quanto o RSU pode ser reciclado, dessa forma, o próximo nível é a recuperação energética de resíduos.

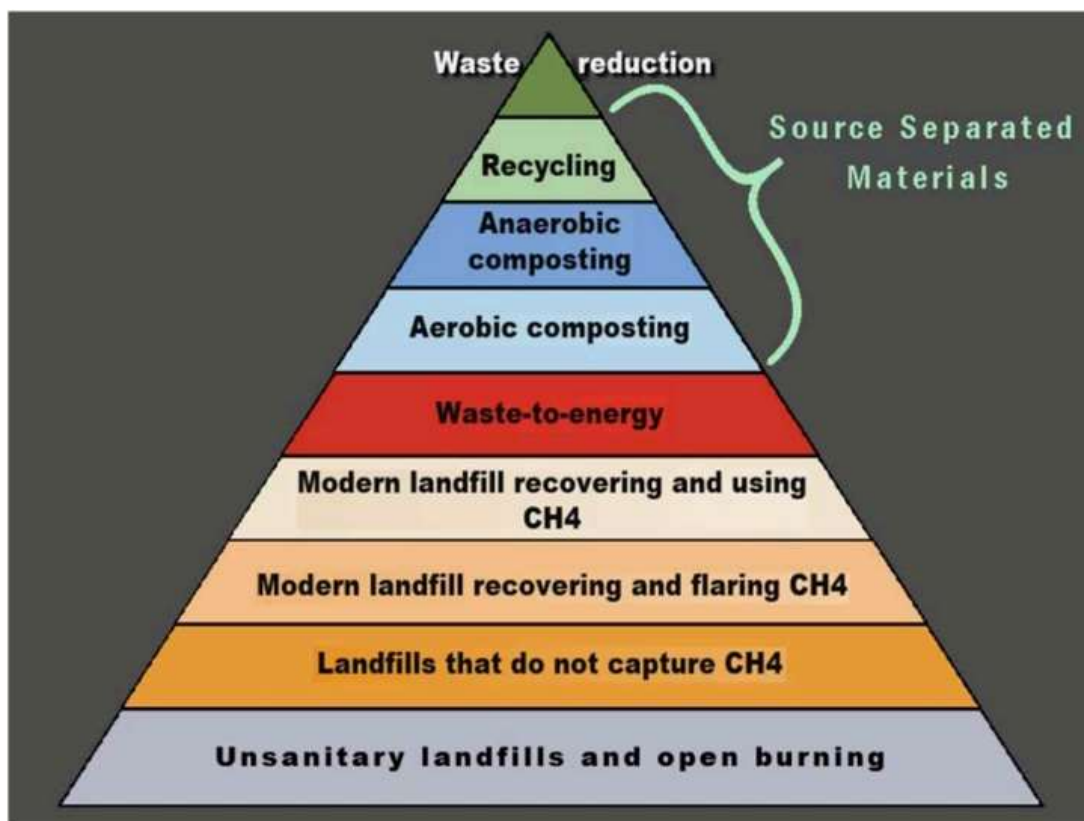


Figura 1 - Hierarquia da Gestão Sustentável de Resíduos; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Países da União Europeia com uma agenda sustentável forte tem aperfeiçoado processos Waste-to-Energy através de tecnologias como tratamento térmico de resíduos, gaseificação, pirólise e plasma. Uma igualdade nas taxas de reciclagem e recuperação energética, bem como a redução do número de aterros, é o resultado que pode ser observado em países da UE que destinam seus resíduos pós-reciclagem para usinas WTE, conforme Figura 2.



Figura 2 - Gráfico Comparativo das Taxas de Resíduos Reciclados, Recuperados Energeticamente e Aterrados, por País da União Europeia; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

O presente trabalho trouxe à discussão os principais processos de recuperação energética e suas tecnologias, estabelecendo uma comparação que evidencie os custos, benefícios e malefícios de cada um deles para, portanto, tentar inserir os mesmos dentro dos parâmetros da realidade brasileira.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral.

O objetivo do presente trabalho é elucidar sobre os principais métodos de recuperação energética, associando estes como alternativas aos obstáculos enfrentados pelo atual método de gestão de resíduos adotado no Brasil.

2.2. Objetivos Específicos.

Apresentar o conceito de economia circular, enfatizando o retorno que esta metodologia, se adotada, trará, bem com as desvantagens que o atual método apresenta.

Dissecar sobre as principais tecnologias envolvidas em uma planta WTE, dando enfoque para os tipos de tratamento térmico de resíduo, gaseificação e pirólise do plástico.

Explicar o funcionamento de uma planta de recuperação energética de resíduos de larga escala e os custos envolvidos para implantação dela.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Cenário Brasileiro e Resíduo Sólido.

Segundo dados do Banco Mundial (2012) é esperado, dentro do período de 2011 para 2025, um aumento de aproximadamente 69% na geração de resíduos sólidos, ou seja, daqui 4 anos é esperado uma geração de 2,2 bilhões de toneladas de RSU por ano no mundo.

Com um aumento de 3,15 bilhões de pessoas vivendo em áreas urbanas desde 1950, o processo de urbanização está aumentando significativamente e segundo dados da Organização das Nações Unidas (2014) a população urbana mundial em 2050 será de 6,4 bilhões de pessoas. Isso acarretará um aumento na taxa de geração de RSU e, a partir de dados do Banco Mundial, é projetado um aumento de 82,8% nos custos para um gestão adequada de resíduos.

O cenário chama a atenção do mundo para as consequências que a urbanização trará para a Gestão de Resíduos Sólidos e seus custos, inclusive para o Brasil.

Com uma área geográfica de 8.515.767 Km² e uma população de, aproximadamente, 213,2 milhões de habitantes (IBGE, 2021), o Brasil é dividido em 27 estados e 5.570 municípios. Do total da população, 56% é dividida somente em 306 municípios.

O total de resíduos sólidos gerado no Brasil em 2018 foi de 216.629 toneladas por dia, apresentando um aumento de 0,82% em relação ao ano anterior. O volume de resíduo coletado apresentou um aumento mais expressivo entre os anos de 2017 e 2018, se comparado a taxa de geração, onde houve um crescimento de 3.261 toneladas de materiais coletados por dia (1,66%), atingindo uma quantidade total de 199.311 toneladas de coletas diárias. (Abrelpe, 2018/2019).

Segundo o Panorama Nacional de Resíduos Sólidos 2018/2019 (Abrelpe), aproximadamente 73% dos municípios brasileiros fazem algum tipo de coleta seletiva, mesmo que, em muitos deles, essas atividades são incipientes e não abrangem todos os bairros (Figura 3).

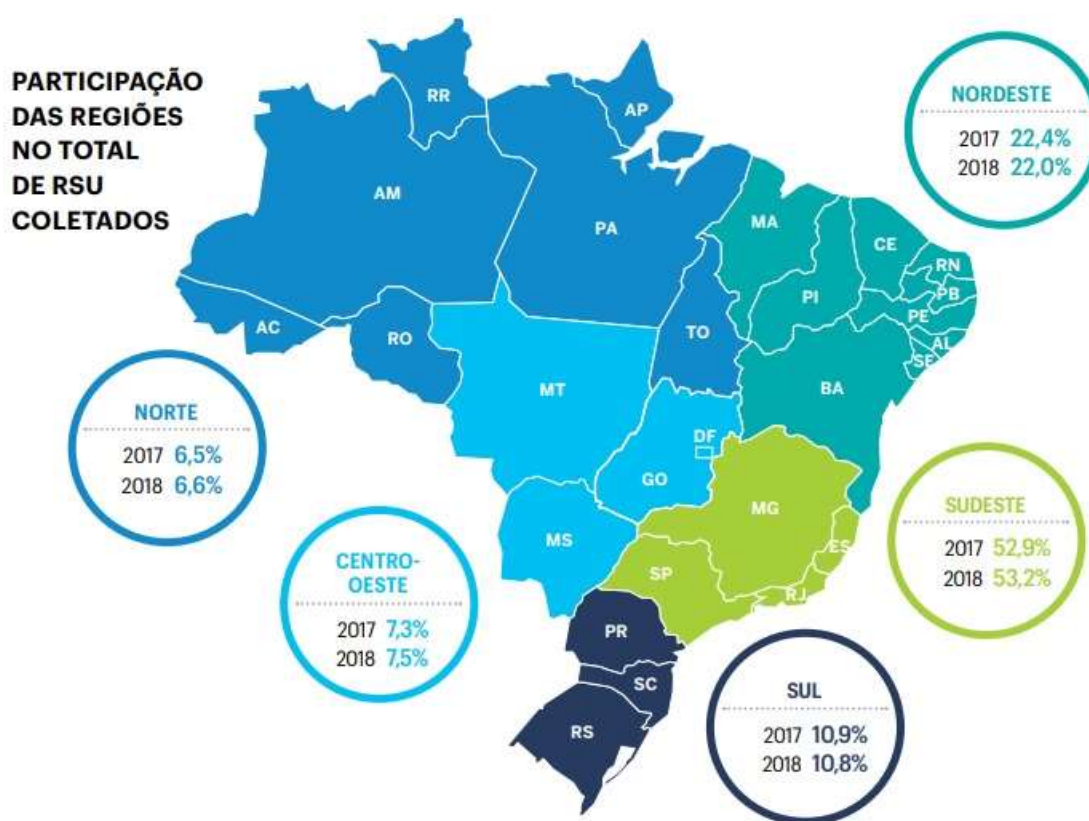


Figura 3 - Taxas Regionais que compõe o Total Nacional de RSU Coletado; Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019

Apesar da taxa de 92% de resíduo sólido coletado anualmente em 2018, representando 72,7 milhões de toneladas, apenas 59,5% desse montante é destinado corretamente para aterros sanitários, ou seja 29,5 milhões de toneladas de lixo coletado são destinados para aterros controlados e lixões (17,5% e 23%, respectivamente). No Brasil, 2.569 aterros sanitários, 1.508 aterros controlados e 1.493 lixões receberam esses materiais proveniente das coletas realizadas, os dois últimos apresentam um elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos para à saúde.

Mesmo com a elevação no percentual de geração e da taxa de resíduo coletado, quando se trata do investimento nos serviços de coleta e adjacentes se percebe um recuo de 1,47%, indo de R\$ 10.145.000,00 para R\$ 10.031.000,00 por ano.

É possível mudar a situação atual adotando tecnologias modernas para recuperação de materiais (reciclagem e compostagem) e recuperação energética, utilizando o RSU como combustível em uma usina WTE para produção de eletricidade e/ou energia térmica.

O fenômeno de urbanização citado acima está associado à oferta e demanda de energia, uma vez que, dentro do contexto de produção-consumo nos sistemas econômicos ocidentais, quanto maior uma população, maior a oferta e demanda de energia e, conseqüentemente, maior as emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera.

3.2. Energia e Economia Circular

Geração de energia é uma necessidade inevitável para garantir a demanda gerada pelo consumo de bens e serviços. Ambos dependem da geração energética e quanto maior a demanda de produção, maior será a demanda de energia. Para suprir essa necessidade é necessário aumentar a produção energética ou tornar as redes de energia mais eficientes.

Energia primária deve ser transformada em energia secundária e aí ser distribuída para uso final. Esse sistema de produção-consumo de energia primeiramente extrai o combustível em sua forma natural, como gás natural, resíduos vegetais e animais, sol e vento, para transformá-los em produtos que serão consumidos por indivíduos, famílias, indústrias e países.

Segundo a primeira lei da termodinâmica, energia pode ser transformada de uma forma para outra, mas ela não pode ser criada nem destruída. Seguindo para a segunda lei da termodinâmica, se o processo de transformação ocorrer de forma espontânea, a energia irá de uma forma mais concentrada para uma forma dispersa, havendo dispersão de energia no processo.

De 1971 para 2018, o consumo de energia dobrou, indo de 4.243 Mtoe para 9.937 Mtoe. O fornecimento total de energia em 2018 foi 2,6 vezes maior que em 1971 e teve sua estrutura alterada, conforme Figura 4.

Total energy supply by fuel

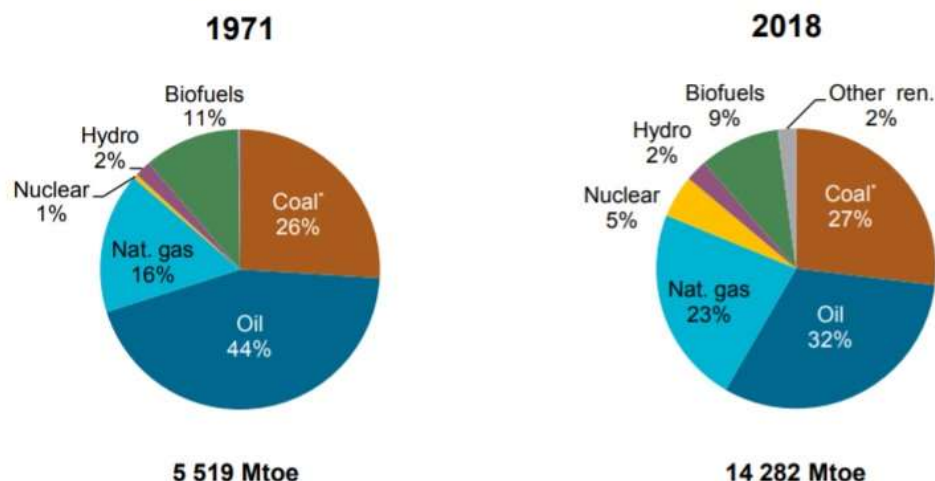


Figura 4 - Comparativo do Consumo de Energia entre 1971 e 2018; Fonte: Legal aspects of introducing waste-to-energy (WTE) technology in Sao Paulo State of Brazil: The case studies of URE Barueri and city of Sao Paulo

O Brasil acompanhou a tendência mundial e teve um aumento de 100% no consumo de energia, no período de 1990 até 2019, e, assim como o restante dos países, teve sua estrutura de consumo alterada: a indústria teve uma queda de 4 pontos percentuais no total geral de consumo energético neste período, indo de 36% nos anos 90 para 32% em 2019; o consumo relacionado a transportes teve alta no período, subindo seu percentual de 30% para 38% e se tornando o setor que mais consome energia em 2019; o consumo residencial teve uma queda de quatro pontos percentuais ao passo que comércios e serviços tiveram alta de 2 pontos percentuais, atingindo 12% e 6%, respectivamente, em 2019 (Figura 5).

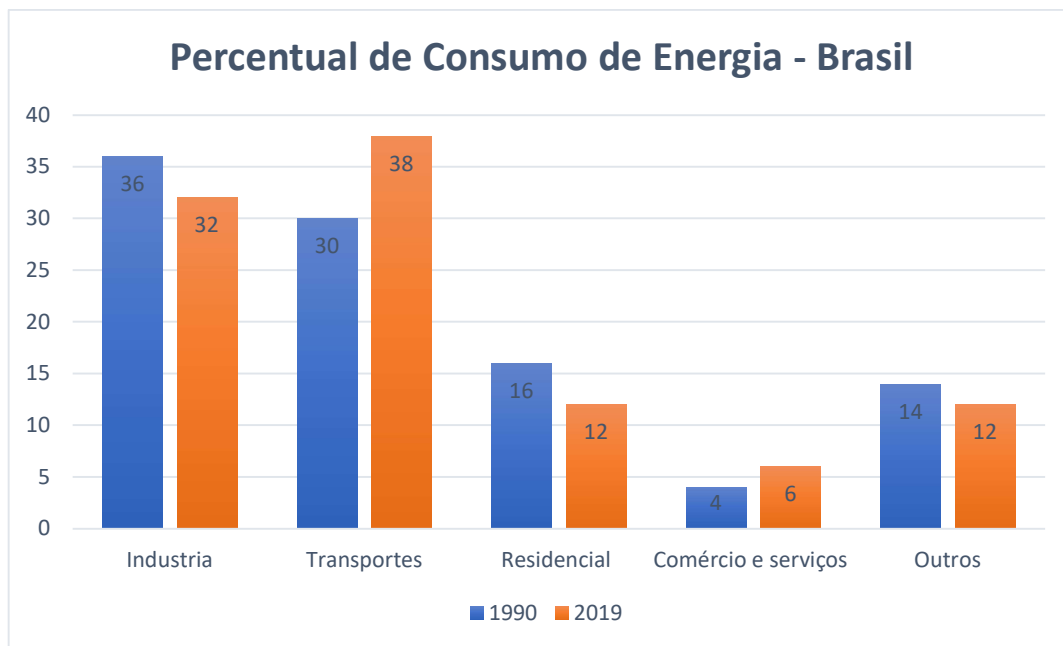


Figura 5 - Energia Consumida por Setor no Brasil

A necessidade de implantação de um sistema mais eficiente para gestão e a demanda energética brasileira, possibilitam que estudos sejam direcionados nesse sentido, buscando estabelecer uma relação de auxílio entre ambos.

Tradicionalmente, quando os recursos naturais são abundantes, a produção e consumo de bens seguem uma direção linear: da extração da matéria-prima, sua transformação em algum produto utilizável, seu consumo e sua disposição final. Entretanto, essa via de mão única deixa lacunas em aberto ou simplesmente não consideradas:

- Potenciais perdas na cadeia de produção;
- Vida útil dos resíduos (Praticamente 60% dos resíduos poderiam ser reciclados, reutilizados ou destinados à compostagem);
- Perda residual de energia pela disposição de produtos em aterros;
- Degradação do ecossistema;
- Alto valor e volatilidade do preço real das commodities;
- Incapacidade de lidar com tendências demográficas;
- Incapacidade de lidar com necessidades estruturais;

- Assuntos políticos que podem interferir no sistema de gestão;
- Mercados globalizados;
- Aquecimento Global.

A ideia de reutilizar e reciclar é resultado da extensão desse sistema de mão única para um sistema cíclico, onde o produto seria remodelado ou convertido em outro produto (Manaham, 2013, p. 382); alumínio, por exemplo, é 100% reciclável e permite uma economia energética de 95% em relação a sua produção primária (Mansor et al, 2010, p71).

Normalmente, as fontes geradoras de resíduo são facilmente identificadas, como residências, construção civil ou hospitais, por exemplo; e esse material coletado se torna parte de uma cadeia de resíduo também facilmente identificável, com papel, plástico, lixo eletrônico ou resíduo orgânico. Para que haja uma gestão adequada de resíduos, é necessário que os tipos de materiais sejam coletados e separados corretamente, de acordo com devida utilização a fim de dar a melhor solução técnica, econômica e social possível (UNEP, 2013).

O engajamento das partes interessadas é essencial para o sucesso de uma gestão de resíduos. Por exemplo, redução de resíduos está diretamente relacionado com o design do produto, a escolha dos materiais e sua produção, dessa forma, profissionais desses setores precisam estar alinhados com essa proposta. Assim como os profissionais que atuam com coleta de resíduos, transporte, compostagem e digestão anaeróbica, recuperação energética e aterros sanitários e a população em geral.

Há duas grandes regras a serem seguidas dentro de uma forte política de resíduos: prevenção contra geração de resíduos (produtos) e gestão dos resíduos gerados. Esse sistema cíclico de gestão – Figura 6 - é chamado de economia circular, no qual, a ideia é otimizar os processos envolvidos numa gestão de resíduos, aumentando os percentuais de reciclagem e diminuindo o número de aterros.

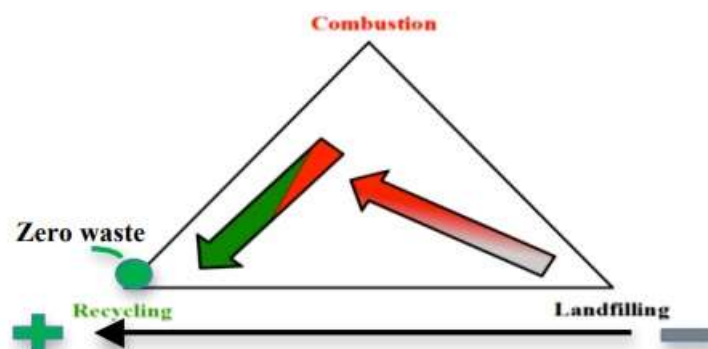


Figura 6 - Economia Circular da Gestão de Resíduos; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Abordando o tema do desenvolvimento sustentável e baseado na hierarquia da gestão de resíduos há alguns fatores que devem ser levados em consideração: as partes interessadas, os elementos do sistema de gestão e os aspectos técnicos, econômicos, ambientais, socioculturais, institucionais e políticos (Figura 7).



Figura 7 - Elementos de Análise para Tomada de Decisões em Ações que Visam a Sustentabilidade; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Em uma gestão integrada e sustentável de resíduos (ISWM), os stakeholders são aqueles que tem interesse nessa gestão ou são afetados por isso. A política do sistema de gestão é dividida em três fases: o desenvolvimento, a implementação e a avaliação. Nessa parte é onde será escolhido o modelo cíclico de lidar com resíduos, colocando o resultado final de volta em alguma etapa do processo que o gerou. A terceira dimensão do ISWM são os aspectos que envolvem o sistema de gestão. Em todos os estágios do ciclo de vida de um produto, da extração até disposição final, há poluição e emissão de GEEs junto com a geração do resíduo.

Os objetivos de um plano de gestão de resíduos sólidos urbanos (PGRS) é evitar a degradação dos recursos naturais, perdas de energia e os impactos negativos na saúde humana, advindo do modo como produzíamos e consumíamos bens. O direito a uma gestão decente de resíduos em conjunto aos benefícios da otimização do uso dos recursos, com o menor custo possível, e dentro das condições locais de manejo, integram essa hierarquia e visão cíclica da gestão de resíduos, colocando todos os elementos em equilíbrio.

Na economia circular, a conexão do sistema de gestão de resíduos com os aspectos sociais, técnicos, financeiros, e legais são essenciais para uma gestão adequada de resíduos.

3.3. Recuperação Energética de RSU

Uma vez que a energia está se tornando cada vez mais escassa devido ao aumento da população e, conseqüentemente, da urbanização e consumo de produtos, elevando, assim, a oferta e demanda destes produtos ao redor do mundo, é necessário considerar a recuperação energética de resíduos sólidos como uma alternativa à disposição dos mesmos em aterros sanitários. Além da geração de energia, estima-se que o volume de resíduos que seria destinado a aterros sofreria uma redução de 80-90% e uma redução de 60-70% em massa se destinados primeiramente a plantas WTE (Lomabardi, Carnevale, Corti, 2015), reduzindo assim a necessidade de áreas extensas de terrenos para destinação final de resíduos; adicionado a isso, as tecnologias de recuperação energética destroem os patógenos presentes nos RSU e reduzem a emissões de GEE (Themelis, 2015).

O recurso proposto, de recuperar energeticamente os RSU, não compete com a reciclagem de materiais, uma vez que, esse último, possui limitações e não é todo material que tem a possibilidade e viabilidade de ser reciclado, porém alguns desses recursos rejeitados na reciclagem ainda podem ser recuperados energeticamente. A tabela abaixo evidência as vantagens e desvantagens dos dois modelos de destinação de resíduos acima citados. É visto em países que adotaram tecnologias WTE que os percentuais de reciclagem e recuperação energética estão próximos, evidenciando também a redução massiva dos percentuais de resíduos destinados a aterros sanitários.

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens dos Aterros em Comparação com o processo Waste-To-Energy

Disposição	Vantagens	Desvantagens
Aterro	Solução universal prevista como última opção de disposição, segundo hierarquia	Necessário utilização de uma grande área de terreno para disposição
	Tecnologia barata e de fácil implementação	Não atinge os objetivos de redução do volume de resíduos sólidos urbanos ou transformação dos mesmo em recursos reutilizáveis
	Gases emitidos nos aterros podem ser captados e usados como subproduto para uso residencial e industrial	Pode ocasionar contaminação do lençol freático, poluição atmosférica e contaminação do solo
Recuperação Energética de Resíduos	Calor utilizado com fonte de energia para produção de vapor e/ou eletricidade	Elevado custo de operação e manutenção
	Plantas de recuperação energética podem ser alocadas próximas a áreas residenciais	Equipamento de controle de poluição do ar é necessário para tratar o gás de combustão
	Otimiza utilização do terreno e propõe integração de recursos de forma mais eficiente se comparado à aterros	Possível impressão negativa da sociedade num primeiro momento, devido às emissões de dióxidos
	Emissões atmosféricas controladas	As cinzas (Produtos da combustão) devem ser descartadas em aterros para resíduos perigosos
	Redução substancial (90%) no volume total de resíduos que seriam dispostos em aterros	Necessidade de operadores capacitados (experiência requerida)

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são ricos em energia e as plantas de recuperação energética liberam essa energia em forma de calor e eletricidade através de um processo de conversão termoquímica, com combustão,

gaseificação e pirólise (Lomabardi, Carnevale, Corti, 2015), conforme o esquema da figura 8.

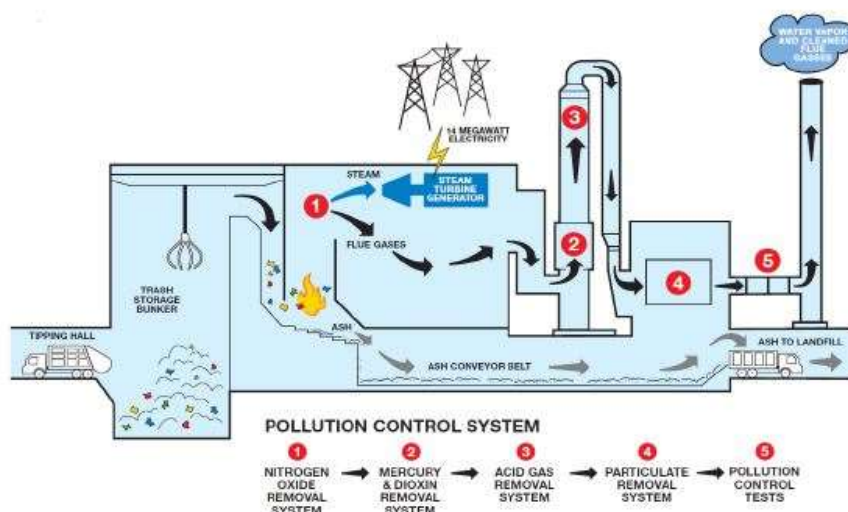


Figura 8 - Esquema de Planta WTE; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

3.3.1. Tratamento Térmico

Produtos impossibilitados/inviabilizados de serem reciclados podem e devem ser aproveitados como combustível de uma caldeira de incineração em uma planta WTE. Sendo assim, há basicamente duas direções a serem seguidas: combustão em massa de RSU ou a combustão de resíduos sólidos pré-processados, ou seja, depois de terem sido retirados materiais ferrosos, vidros, areia e outros materiais que não são combustíveis. A seguir serão apresentados os principais métodos de tratamento de térmico de resíduos.

3.3.1.1. Combustão em Grelha

Nesse processo, conforme apresentado na figura 9, os rejeitos são despejados em poço de resíduos com capacidade de armazenamento suficiente para o volume de uma semana. Uma garra coletora e uma ponte rolante empurram o material em uma calha que alimenta a fornalha e, posteriormente, esse material é enviado as grelhas móveis. Esta pode estar disposta horizontal ou diagonalmente e refrigerada a água ou ar. O movimento das grelhas

gradativamente move o leito dos resíduos através da câmara de combustão. As cinzas – produto da oxidação de objetos a altas temperaturas – são descartadas na ponta final da grelha.

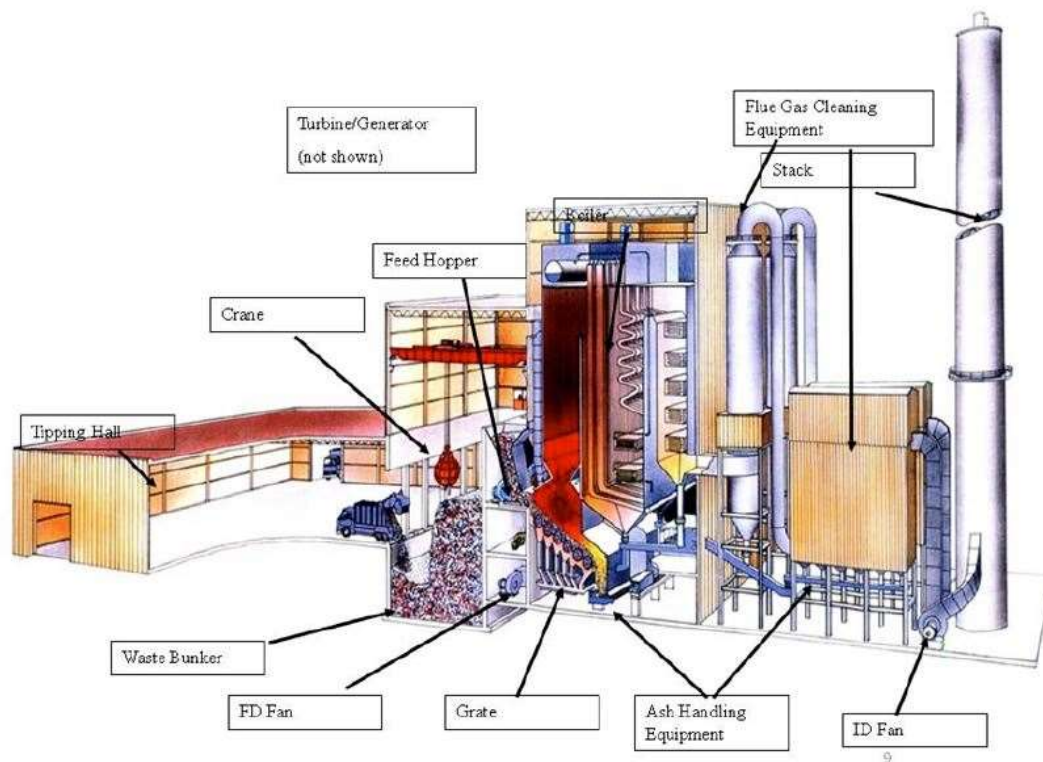


Figura 9 - Esquema de Planta de Combustão em Grelha; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

As plantas WTE que adotam essa tecnologia de tratamento térmico são cogeradoras de eletricidade e aquecimento distrital, uma vez que o calor contido nos gases de combustão é transformado em vapor de alta pressão (aquecimento distrital), através dos tubos de água da caldeira, acionando, assim, o turbo gerador de eletricidade (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

3.3.1.2. Combustível Derivado de Resíduos (RDF)

Considerado um avanço em relação a combustão em grelha, a tecnologia RDF (Refused Derived Fuel) traz o conceito da separação dos materiais comerciáveis do volume de RSU que seriam queimados em massa na câmara de combustão. Nos EUA, a aplicação desse método consiste na trituração do resíduo coletado para depois processamento dos materiais nele contidos que

possuem valor de mercado. Na Europa, no entanto, esse mecanismo sofre uma variação: há o tratamento do RSU misturado – o qual muitas vezes é úmido a ponto de impossibilitar a combustão dentro das câmaras – para que ele se torne RDF, processo conhecido como Tratamento Mecânico Biológico (MBT).

Para explicar o funcionamento da tecnologia RDF vamos tomar como exemplo a planta WTE SEMASS, localizado em Rochester, Massachussets nos Estados Unidos, esquematizada na figura 10. Os resíduos destinados a essa planta – cerca de 2700 toneladas/dia – são triturados para um tamanho de aproximadamente 15 cm com um martelo hidráulico. Após trituração, esse material é enviado a um separador magnético que retira em torno de 50% do material ferroso contido no montante de RSU. Nesse momento duas correias entram em jogo, uma transportando o material ferroso coletado para um prédio de armazenamento, e outra direcionando o resíduo para as calhas de alimentação das caldeiras. Essa correia se move a uma taxa constante de modo que não haja congestionamento da carga na calha. Essa carga é carregada por uma corrente de ar para dentro da caldeira em estado quase fluidizado (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

As cinzas resultantes do processo de combustão são conduzidas através de um separador magnético para recuperação de material ferroso e depois para separadores tipo Eddy-current, para recuperação de materiais não ferrosos, visto que nem todo conteúdo ferroso é recuperado antes da queima e o valor de mercado para materiais ferrosos recuperados da cinza de fundo atingem patamares elevados em relação aos recuperados no começo do processo.

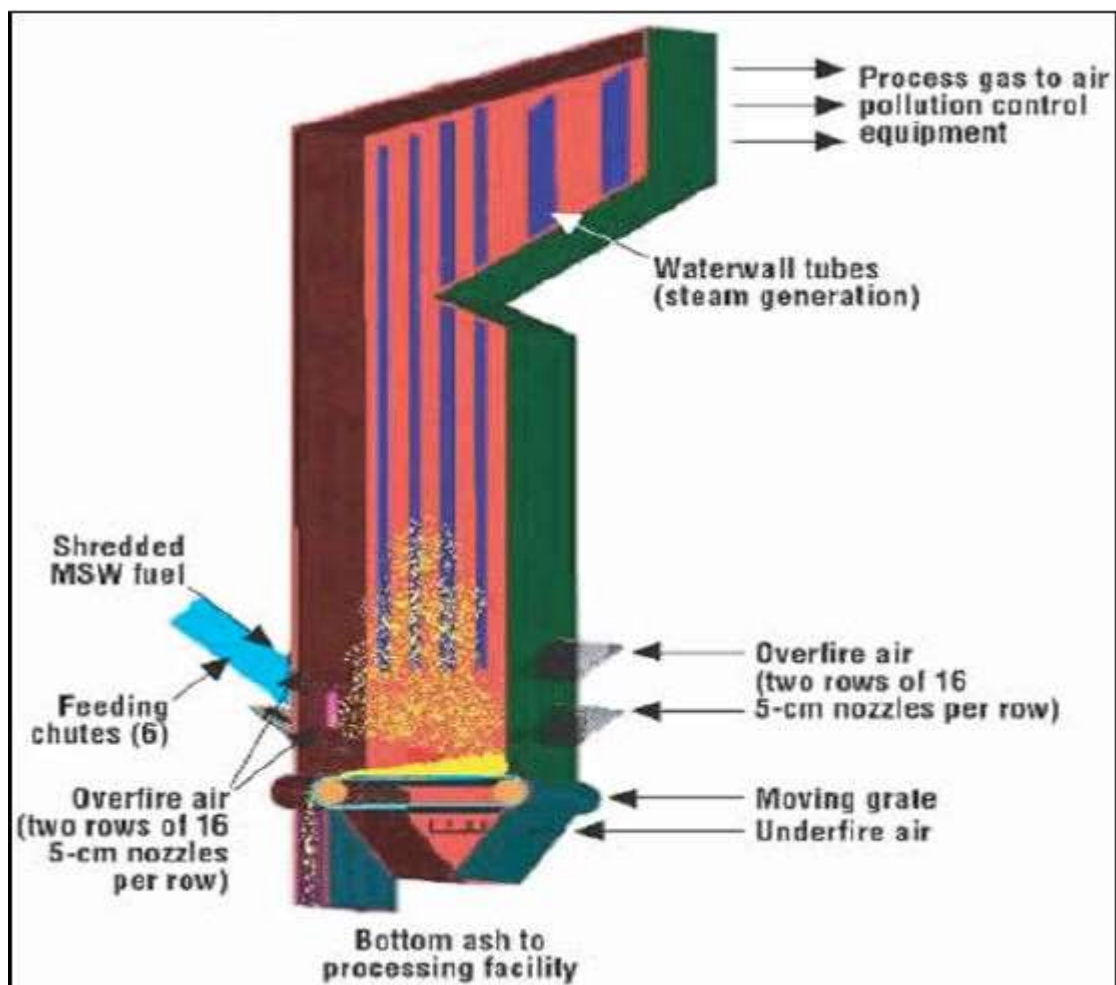


Figura 10 - Esquema de Funcionamento da Planta WTE SEMASS em Rochester, Massachussets nos EUA; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Levando em consideração o lado técnico do processo: as taxas de transferência de massa e calor aumentam com granulometrias menores e certo grau de homogeneização facilita o controle de combustão na fornalha, ou seja, a trituração do RSU heterogêneo em uma composição e granulometria mais uniforme é benéfico. O resultado é uma produtividade específica maior em relação a tecnologia de combustão em grelha.

3.3.1.3. Combustão em Leito Fluidizado

Processo aplicado para secagem do zinco e no processamento de outros materiais, em caldeiras a lenha e biomassa, que consiste na conversão de um leito de sólidos em fluido pela introdução de um fluxo gasoso através da base do leito. A mecânica de processamento se dá pela disposição de partículas sólidas

em uma placa perfurada dentro de um cilindro vertical. Este ambiente está sujeito a injeção de gás à uma taxa de fluxo que cresce constantemente. À medida que há um aumento dessa taxa, as partículas são suspensas e o leito de sólidos começa a se comportar como um líquido em ebulição. Quando há uma abertura na parede, parte do material disposto nesse “leito de fluido borbulhante” (BFB – Bubbling Fluid Bed) fluirá através dessa abertura (corrente de sobre fluxo). O aumento da taxa de injeção de gás na placa perfurada ocasiona na suspensão das partículas e estas podem ser arrastadas pra fora do reator (corrente de arraste), conforme é apresentado na figura 11.

Tal tecnologia tem sido aplicada na combustão de combustíveis sólidos derivados do processamento de RSU, no chamado Leito de Fluido Circulante (CFB – Circulating Fluid Bed). Nessa aplicação, a corrente de arraste do reator passa através de um ciclone pelo leito fluido e separa a maior parte dos sólidos da corrente de gás, depois retorna os mesmos para o reator para processamento adicional, (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

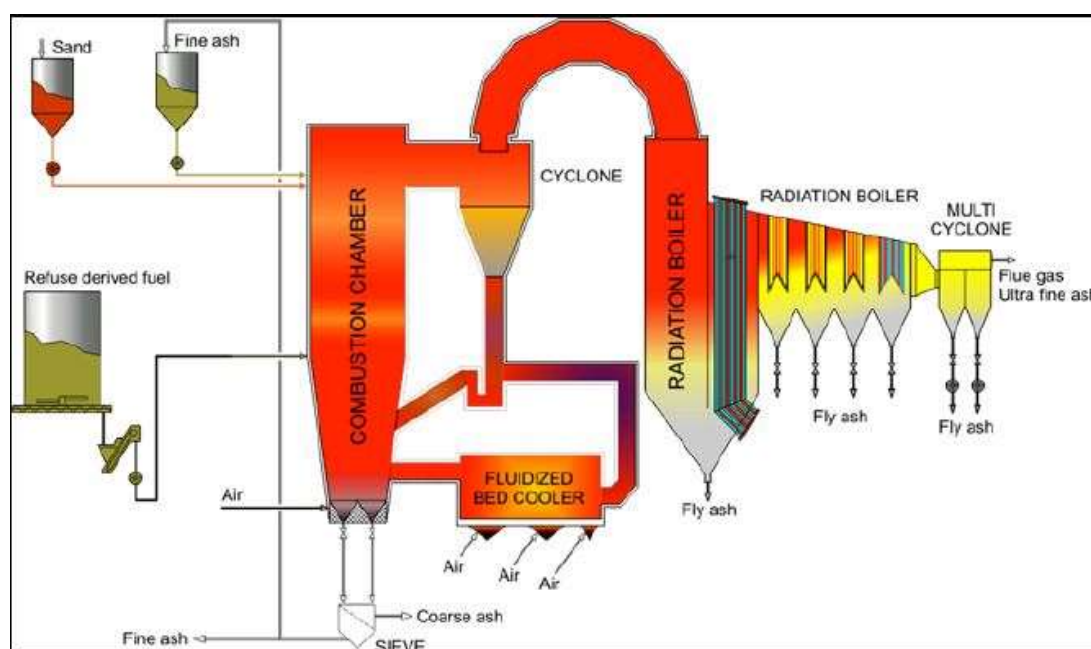


Figura 11 - Esquema de Tecnologia de Leito Fluidizado; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

3.3.1.4. Tratamento Mecânico Biológico (MBT)

Restos de comidas e podas de jardim estão presentes nos resíduos sólidos urbanos a uma taxa de aproximadamente 25% em nações desenvolvidas e 50-55% em países em desenvolvimento (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013). A remoção desses materiais orgânicos, que contém muita umidade, aumenta o poder calorífico do RSU parcialmente seco. O processo de MBT, apresentado na figura 12, vem para auxiliar nessa questão propondo uma separação da massa de resíduo em três esferas: materiais recicláveis, materiais orgânicos, e um resíduo combustível que é chamado de “combustível recuperado de sólidos” (SRF – Solid Recovered Fuels).

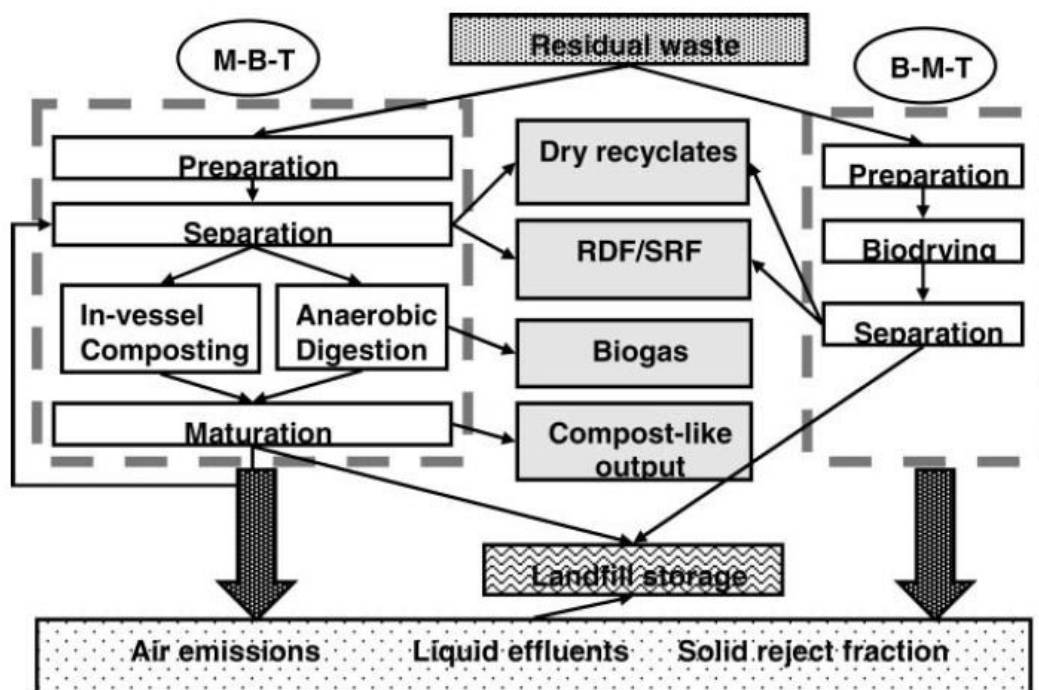


Figura 12 - Esquema de Tratamento Mecânico Biológico; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

3.3.2. Tecnologias de Gaseificação

Atuando como um parceiro das tecnologias de tratamento térmico de resíduo, o processo de gaseificação consiste na combinação de oxidação parcial e volatilização dos compostos orgânicos contidos no material (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013). Basicamente compostos de dois fornos onde, no primeiro, ocorre a gaseificação e no segundo a combustão dos gases voláteis e geração de vapor. As emissões de GEE são tão baixas quanto nos processos

de combustão de RSU e a vantagem em relação a estes é a produção de cinza já vitrificada, que não terá como destino aterros sanitários.

3.3.2.1. Processo de Redução Direta

Criada pela JFE (Holding situada na cidade de Tóquio, Japão), a tecnologia consiste na gaseificação do RDF (Combustível Derivado de Resíduo). O RSU bruto passará por um processo de trituração para ser convertido em RDF e, posteriormente, encaminhado para as plantas de redução direta (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013). Essas plantas que aplicam tal tecnologia WTE são compostas por um forno siderúrgico de menores proporções e relativamente alto que são alimentados com RDF pelo topo, através de um alimentador tipo parafuso, de acordo com o que é apresentado na figura 13. Dentro o forno é introduzido ar em volutas primárias, secundárias e terciárias e à medida que a carga desse ela é gaseificada e seus componentes inorgânicos são submetidos a altas temperaturas e derretidos em escória e metal, que serão retirados na base do forno.

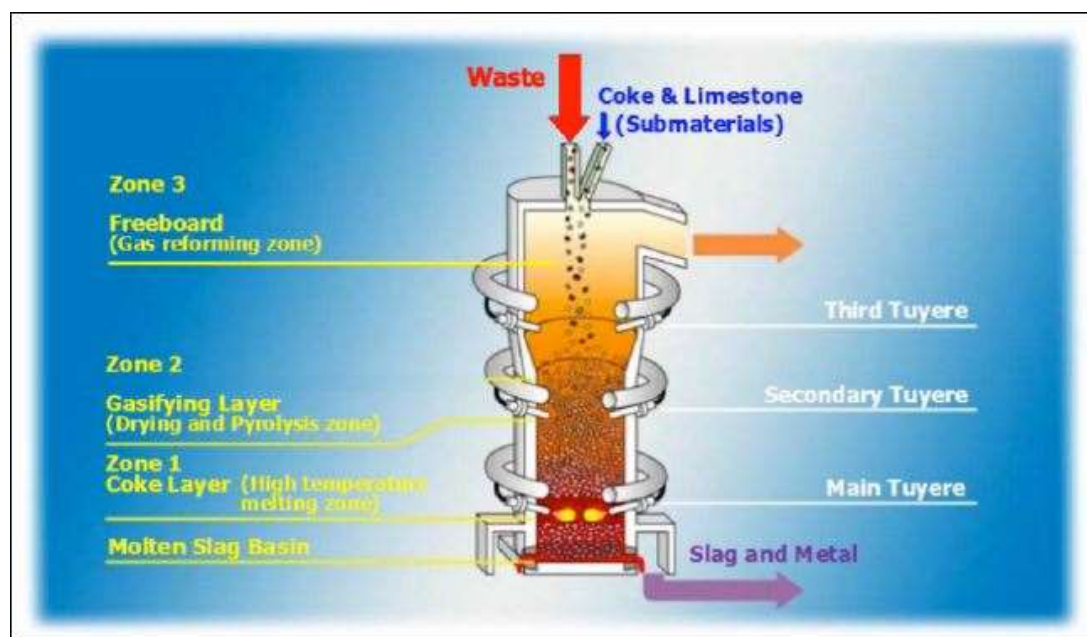


Figura 13 - Processo de Redução Direta; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Essa combinação de processos consegue lidar com uma taxa de umidade de 65% nos RSU – uma vantagem se comparada à métodos de combustão tradicionais onde a taxa de umidade aceitável varia de 40 a 50% nos resíduos sólidos urbanos.

3.3.2.2. Combustão em Grelha e Gaseificação

Tecnologia desenvolvida na Noruega a fim de apresentar uma alternativa as plantas WTE de combustão em grelha que tinham condições de receber, além do RSU, fluxos adicionais de resíduos industriais e/ou comerciais, ou seja, esse processo consiste no tratamento de resíduos pós-reciclagem somados a volumes menores de outras fontes de resíduos.

A carga passa por um processo de trituração e posterior separação magnética dos metais ferrosos para, assim, ser encaminhada a primeira câmara do processo. Nesta, a carga é disposta em grelhas móveis e sujeita a condições sub-estequiométricas (relação ar/combustível, $\lambda = 0,5$ a $0,8$) para parcial oxidação e gaseificação do material. Os gases voláteis gerados são queimados em uma câmara anexa para geração que será transferido para o vapor d'água em um sistema de recuperação de calor. Na finalização do processo, é adicionado cal com carvão ativado ao gás quente e inerte advindo da geração de vapor, que passará por filtro manga e um silo de recolhimento de pó, para absorção dos compostos ácidos e moléculas de metais pesados presente no gás quente (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

3.3.2.3. Processo Ebara de Leito Fluidizado

Primeiramente, nesse processo, os resíduos sólidos urbanos são submetidos a combustão e trituração em um reator de leito fluidizado. Posteriormente, o gás produzido dentro do reator é direcionado ao forno é queimado, gerando uma temperatura de aproximadamente 1.350°C e formando uma cinza vitrificada em formato de escória, que pode ser utilizada em obras de construção civil (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013), conforme figura 14.

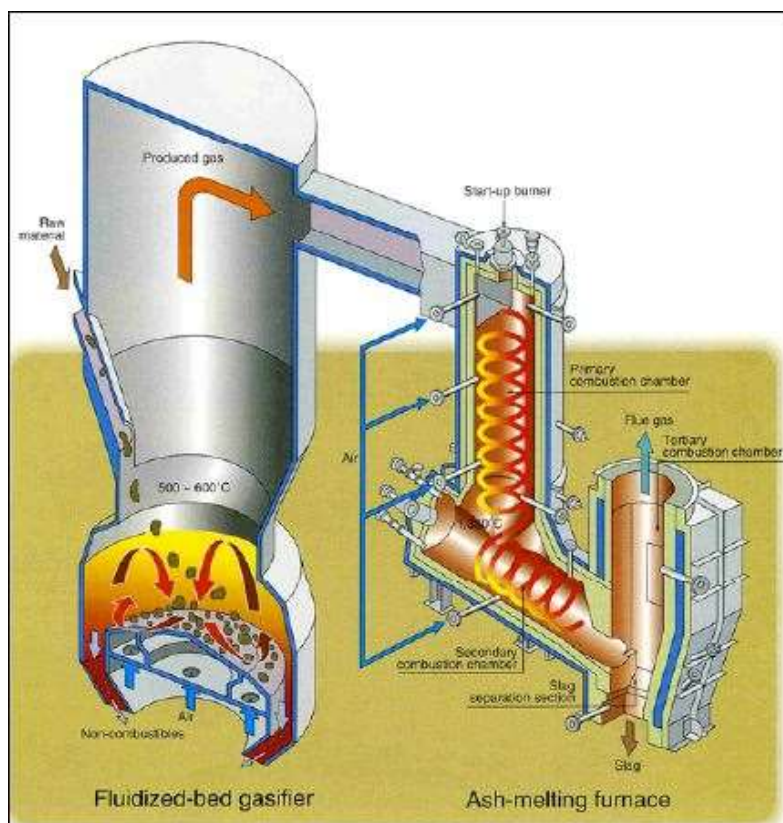


Figura 14 - Esquema do Processo Ebara de Leito Fluidizado; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing region

3.3.2.4. Tratamento por Plasma

Tecnologia que tem sido aplicado durante longo período, principalmente para proteção de superfícies e destruição de materiais perigosos como o Amianto, por exemplo, a chama de plasma é um mecanismo que transforma a eletricidade em calor através de uma corrente elétrica conduzida por um fluxo de gás (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

Para o tratamento do RSU, tal tecnologia é aplicada para gaseificar os sólidos, quebrar as moléculas dos gases voláteis e para vitrificar as cinzas. Nesse processo ocorre a produção do Syngas – mistura de hidrogênio e monóxido de carbono – que pode ser queimado em um motor ou turbina a gás para geração de eletricidade ou usado na produção de combustíveis sintéticos. Um esquema de funcionamento de uma planta para tratamento por plasma pode ser observado na figura 15.

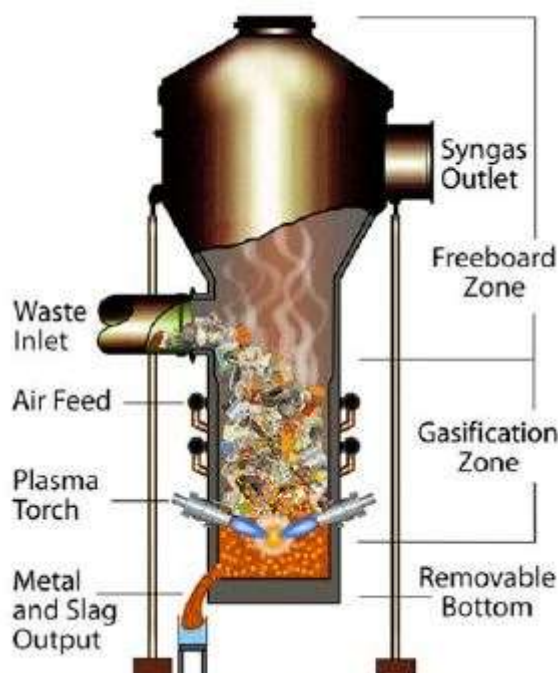


Figura 15 - Esquema de Tratamento por Combustão em Chama de Plasma; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

Se comparado ao processo de combustão em grelha e gaseificação, o tratamento do RSU auxiliado por plasma apresenta uma redução de 75% no fluxo de gás, o que é uma vantagem. Porém, devido ao uso da eletricidade para formar a chama de plasma, espera-se que a capacidade de produção por tonelada de RSU processado seja a mesma do processo de combustão em grelha.

3.3.3. Pirólise de Resíduos Plásticos

Essa tecnologia apresenta uma solução voltada aos resíduos plásticos separados na fonte uma vez que, no processo, não há nenhuma combustão significativa de resíduos, ou seja, é necessário um investimento muito maior de eletricidade do que a gaseificação. Sendo assim, a pirólise não tem sido aplicada no tratamento de RSU em proporções industriais (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

Decomposição química e térmica de um material em atmosfera inerte, quebrando as ligações químicas das cadeias orgânicas configura o processo de pirólise, conforme é mostrado na figura 16. A transformação de resíduos

plásticos em óleo combustível é um exemplo de decomposição pirogênica. Comparando com a reciclagem de materiais plásticos, a pirólise apresenta como vantagem a capacidade de processar volumes de diferentes tipos de plástico extremamente contaminados e transformá-los em produtos com alto valor de mercado gerando o mínimo de resíduo possível. Quando comparado com os processos de gaseificação, essa tecnologia apresenta menor emissão de gases do efeito estufa (GEE), como NOx e SOx por exemplo, e, também, menor perda de calor no processo, uma vez que as temperaturas de operação são menores.

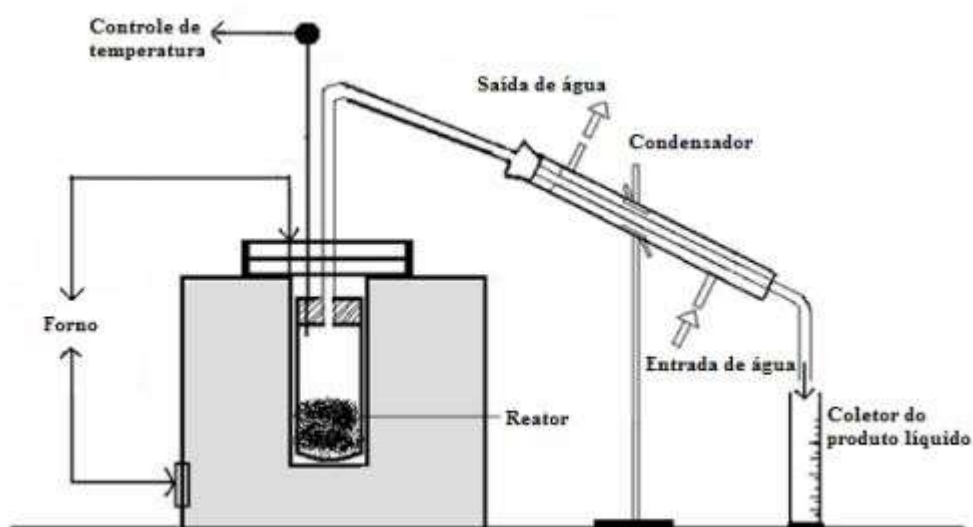


Figura 16 - Esquema de Processo de Pirólise; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

4. METODOLOGIA

Para seleção da melhor tecnologia a ser aplicada em uma usina de tratamento de resíduos, é necessário levar em consideração a área de interesse, em termos de quantidade e características dos resíduos, demandas e preços de energia e disponibilidade de financiamento.

Neste estudo será aplicado a metodologia SWOT (Strengths – Weakness – Opportunities – Threats) como uma análise preliminar das tecnologias, avaliando critérios técnicos, ambientais, sociais e financeiros.

- **CrITÉRIOS TÉCNICOS:**

Tabela 2 - Metodologia SWOT – Critérios Técnicos

CrITÉRIOS TÉCNICOS				
	Força	Fraqueza	Oportunidade	Ameaça
Incineração	Tratamento de múltiplas cadeias de resíduos; Umidade do RSU é um requerimento para o tratamento; Geração de significativa quantidade de energia; Know-How bem desenvolvido para construção e operação.	Menor o poder calorífico da cadeia de resíduos, menor a eficiência da planta; Menor geração de energia se comparada a outras tecnologias.	Utilização para tratamento de resíduos perigosos/contaminados; Eficiência aumenta quando há aproveitamento do calor gerado no processo.	Redução significativa na entrada de resíduos pode gerar problemas técnicos; Competição com plantas industriais intensivas em energia - podem utilizar os mesmos resíduos para processamento.
Gaseificação	Tratamento de múltiplas cadeias de resíduos; Geração de significativa quantidade de energia - maior que outras tecnologias; Know-How relativamente bem desenvolvido.	Pouca experiência em tratamento de larga escala de RSU; Problemática com tratamento de resíduo com alta taxa de umidade.	Tecnologia que tende a crescer no futuro; Desenvolvimento acelerado.	Mudanças na composição do material de entrada afetam a eficiência do tratamento; Competição com plantas industriais intensivas em energia;

Pirólise	Tratamento de múltiplas cadeias de resíduos; Geração de significativa quantidade de energia; Bem desenvolvida para cadeias especiais de resíduos (Plástico, por exemplo)	Tecnologia emergente para o tratamento de RSU; Pouca experiência em larga escala; Requer etapas de pré-tratamento (Trituração, Moagem, etc); Problemática ao tratar resíduos com alta taxa de umidade; Menor geração de energia se comparada com outras tecnologias; Incertezas quanto a eficiência e limitações técnicas.	Facilmente implantado para menores quantidades de resíduos; Avanço no desenvolvimento dessa tecnologia no futuro.	Competição com plantas industriais intensivas em energia.
Plasma	Menor requerimento de pré-tratamento em relação ao resíduo de entrada; Geração de maior quantidade de energia se comparada à outras tecnologias WTE.	Know-How pouco desenvolvido; Tecnologia menos desenvolvida e implantada; Incertezas técnicas; Alto uso de energia.	Tratamento de múltiplas cadeias de resíduos (Amianto, por exemplo).	Alto custo de implantação; Competição com plantas industriais intensivas em energia.

- **Critérios Ambientais:**

Tabela 3 - Metodologia SWOT – Critérios Ambientais

Critérios Ambientais				
	Força	Fraqueza	Oportunidade	Ameaça
Incineração	Sistemas de redução de emissões e tratamento de efluentes; Significante contribuição para redução do aquecimento global pela produção de energia de combustíveis não fósseis.	Emissões significativas, que devem ser controladas; Grande quantidade de efluentes que precisarão ser tratados; Geração de resíduos sólidos perigosos que devem ser descartados.	Performance ambiental melhorada se a energia térmica gerada também for aproveitada.	Problemática na gestão dos resíduos perigosos, aumentando os custos operacionais.

Gaseificação	Menores emissões atmosféricas se comparada com a Incineração; Significante contribuição para redução do aquecimento global pela produção de energia de combustíveis não fósseis.	Geração de resíduos sólidos perigosos que devem ser descartados.		Problemática na gestão dos resíduos perigosos, aumentando os custos operacionais.
Pirólise	Menores emissões atmosféricas se comparada com a Incineração; Significante contribuição para redução do aquecimento global pela produção de energia de combustíveis não fósseis.	Geração de resíduos sólidos perigosos que devem ser descartados.		Problemática na gestão dos resíduos perigosos, aumentando os custos operacionais.
Plasma	Menores emissões atmosféricas se comparada com a Incineração; Significante contribuição para redução do aquecimento global pela produção de energia de combustíveis não fósseis; Geração de resíduos inertes.	Por não ter aplicação em larga escala, pode haver efeitos ambientais ainda não conhecidos;		Emissões atmosféricas reduzidas não são totalmente provadas e atestadas.

- **Critérios Sociais:**

Tabela 4 - Metodologia SWOT – Critérios Sociais

Critérios Sociais				
	Força	Fraqueza	Oportunidade	Ameaça
Incineração	Alternativa para o tratamento de resíduos, especialmente para áreas altamente	Possível percepção negativa dos cidadãos; Atitude problemáticas das cooperativas de reciclagem/recicladores.	Mudança na percepção da sociedade em relação as plantas WTE, quando associada aos	Partes interessadas na gestão de resíduos podem reagir a implantação de plantas WTE.

	urbanizadas e megacidades.		benefícios em relações às mudanças climáticas.	
Gaseificação	Alternativa para o tratamento de resíduos.	Relutância na aceitação de uma tecnologia relativamente nova.	Mudança na percepção da sociedade em relação as plantas WTE, quando associada aos benefícios em relações às mudanças climáticas.	Partes interessadas na gestão de resíduos podem reagir a implantação de plantas WTE.
Pirólise	Alternativa para o tratamento de resíduos.	Relutância na aceitação de uma tecnologia relativamente nova.	Mudança na percepção da sociedade em relação as plantas WTE, quando associada aos benefícios em relações às mudanças climáticas.	Partes interessadas na gestão de resíduos podem reagir a implantação de plantas WTE.
Plasma	Alternativa para o tratamento de resíduos.	Relutância na aceitação de uma tecnologia relativamente nova.	Mudança na percepção da sociedade em relação as plantas WTE, quando associada aos benefícios em relações às mudanças climáticas.	Partes interessadas na gestão de resíduos podem reagir a implantação de plantas WTE.

- **Crítérios Financeiros:**

Tabela 5 - Metodologia SWOT – Crítérios Financeiros

Crítérios Financeiros				
	Força	Fraqueza	Oportunidade	Ameaça
Incineração	Investimento unitário menor, e custo de operação comparáveis com outras tecnologias; Receita com a venda de energia.	Custo de investimento alto quando comparado as outras alternativas de tratamento, como aterros por exemplo.	Benefícios maximizados dependendo da área onde será instalada a planta; Utilização de energia térmica aumenta a receita e viabilidade do projeto; Alto nível de competição entre as tecnologias pode diminuir os custos de investimento.	Muito sensível a significativas reduções na quantidade de resíduos.
Gaseificação	Receita com a venda de energia.	Custos altos de investimento e operação.	Aumento na receita caso parte do resíduo seja considerado renovável.	
Pirólise	Receita com a venda de energia.	Custos altos de investimento e operação.	Sem unidade operando em larga escala, o custo do investimento pode ser menor; Aumento na receita caso parte do resíduo seja considerado renovável e políticas que promovam produção de energia renovável sejam aplicadas.	
Plasma	Receita com a venda de energia.	Custos altos de investimento e operação.	Sem unidade operando em larga escala, o custo do investimento pode ser menor; Aumento na receita caso parte do resíduo seja considerado renovável e políticas que promovam produção de energia renovável sejam aplicadas.	

4.1. Planejamento e Construção de uma Planta WTE

Pensando no cenário brasileiro, onde não há larga implantação de plantas Waste-to-Energy e, conseqüentemente, não há um vasto conhecimento sobre o assunto, e também associado ao fato de que tais plantas exigem um grande investimento, optou-se pela aplicação da tecnologia de menor risco com ampla comprovação e estudos sobre: Combustão do RSU em Grelha Móvel.

Com foco na viabilidade do projeto alguns critérios de aplicabilidade deverão ser levados em consideração no planejamento. O primeiro sugere a necessidade de que a planta WTE tenha condições de processar larga escala de RSU, uma vez que, conforme a figura 17 (Defra, 2007), quanto maior o volume processado na usina, menor os custos com taxa de despejo por tonelada.

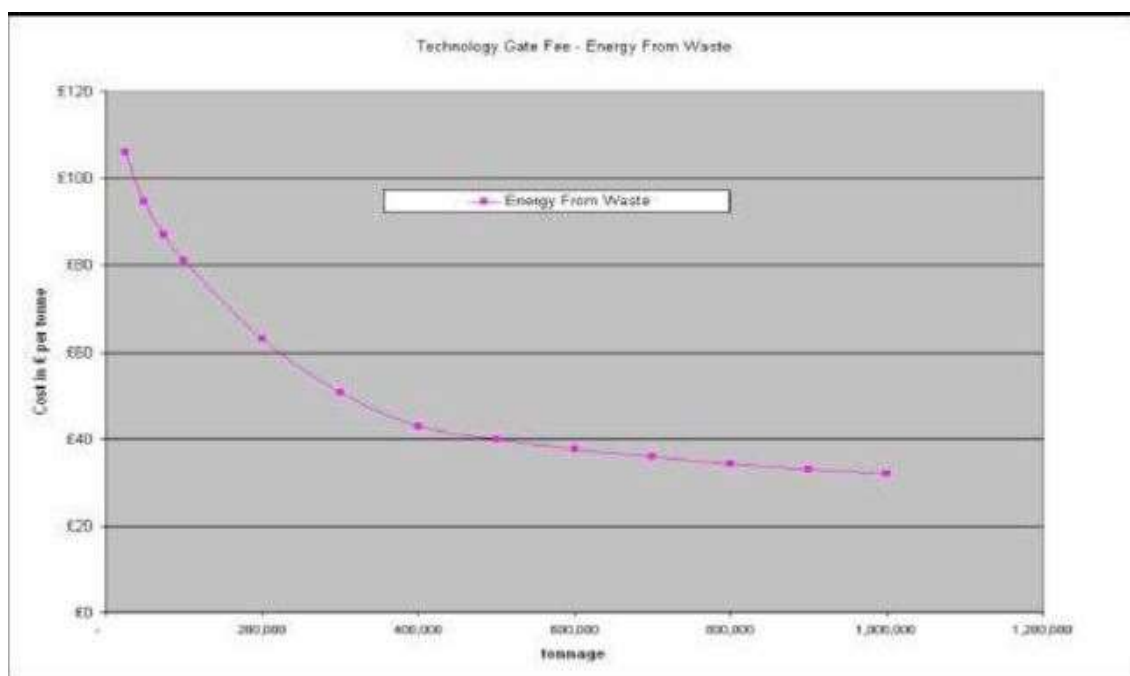


Figura 17 - Gráfico de Custo por Capacidade de Processamento de RSU; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

A figura 17 aponta que os custos crescem exponencialmente e a capacidade de processando anual de RSU for menor que 300.000 toneladas. Adicional a esse critério, entra também a necessidade de uma coleta de resíduos bem-organizada, com um pré-tratamento sólido, aumentando o poder calorífico do mesmo e, ao mesmo tempo, aumentando a eficiência de geração de energia de sua planta WTE.

Levando, ainda, o poder calorífico do material em consideração, é necessário pensar na composição do material que entrará na planta. Resíduos muito

densos, com taxa de umidade elevada consequentemente tem seus poderes caloríficos diminuídos. Sendo assim, é necessário contar com uma coleta seletiva bem-feita para que o material a ser despejado na usina de tratamento térmico seja relativamente leve e apresente na sua composição baixo conteúdo orgânico.

Para que a implantação de uma planta de recuperação energética de resíduos se justifique é necessária uma rede elétrica bem mantida e capaz de absorver a energia ali utilizada/produzida. Combinar essa utilização de energia elétrica com a utilização da energia térmica gerada aumenta a probabilidade do projeto ser viável. Trazendo para o cenário brasileiro, seria interessante instalar a planta próximo a regiões industriais, uma vez que, são indústrias, os possíveis consumidores dessa energia térmica produzida.

A aplicabilidade do projeto é muito sensível a preços, dessa forma, tem-se que considerar os valores de venda da energia produzida, que deve ser alto suficiente para que a taxa de despejo fique em valores comparáveis àquela dos aterros. A Confederação Europeia de Plantas WTE (*Confederation of European WTE Plants – CEWEP*) aponta que, em média, 50% da energia produzida nas usinas de recuperação energética de resíduos é renovável. Com essa informação, é possível contar com políticas de incentivo, como subsídios e certificados verdes, de modo a auxiliar a viabilidade do projeto, visto que a necessidade de produção de energias renováveis é algo reconhecido internacionalmente.

4.2. Planta de Combustão em Grelha

Antes de mais nada, dois estudos devem ser realizados a fim de dimensionar a capacidade que a planta requerida deverá apresentar: O primeiro focado em estabelecer a taxa atual de geração de resíduos e sua projeção para os próximos trinta anos para a comunidade onde será instalado o projeto; e o segundo em apresentar as taxas de reciclagem e compostagem e sua projeção para o futuro. Visto que é essencial uma boa separação dos resíduos, dividindo-os em materiais comerciáveis e aqueles que podem ser encaminhados para incineração e subsequente geração de energia.

Os materiais que podem ser processados em grelha de combustão são: Resíduos residenciais e comerciais remanescentes da reciclagem e

compostagem; resíduos industriais combustíveis, atualmente dispostos em aterros sanitários, que podem ser misturados com o RSU no poço de recebimento; resíduos pós-reciclagem de construção civil; Lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE); pneus triturados, colchões e móveis após reciclagem; e resíduos hospitalares contidos em sacos plásticos selados.

Uma planta WTE de combustão em grelha, esquematizada na figura 18, tem uma disponibilidade anual de aproximadamente 8.000 horas e geralmente apresentam de 1 a 3 linhas processamento, que consistem em uma fornalha, uma caldeira e um sistema de controle de emissões de poluentes na atmosfera. A capacidade de processamento de resíduos da planta varia de acordo com os fatores especificados acima, mas, por exemplo, uma planta com capacidade de 40 toneladas por hora consegue processar 320.000 toneladas de resíduos anualmente (capacidade x disponibilidade da usina).

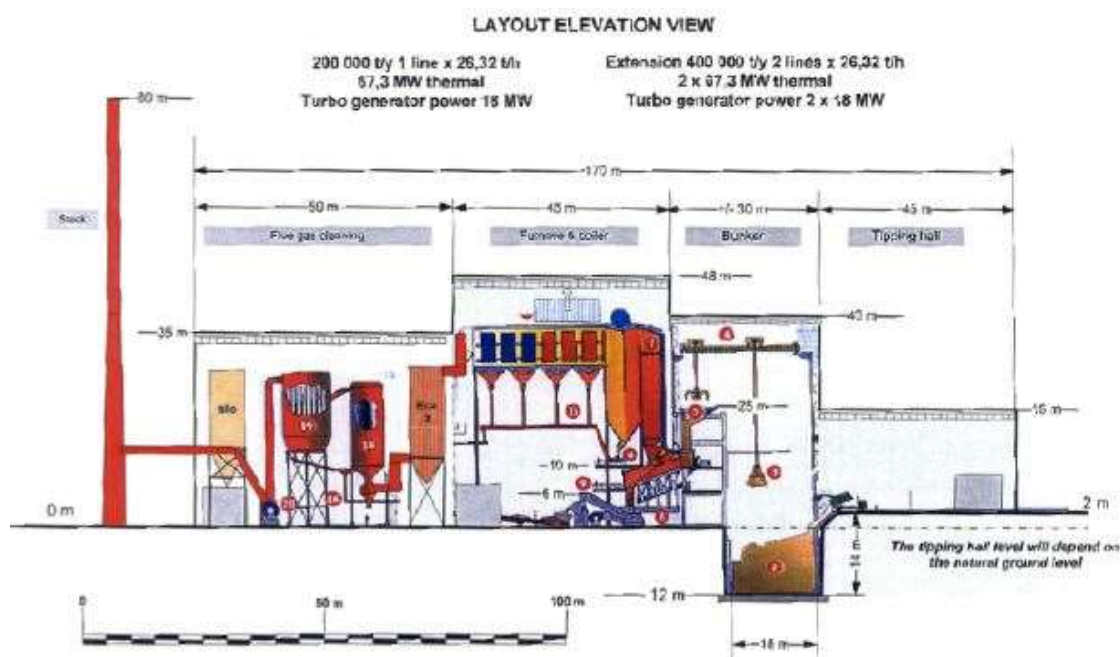


Figura 18 - Esquema de Planta de Combustão em Grelha; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

A usina de recuperação energética deve ser montada em locais que possam se beneficiar estética e funcionalmente de suas instalações, já que, minimizando os custos de transportes, a planta deve ser instalada em locais próximos aos geradores do material a ser processado, ou seja, geralmente dentro de áreas

urbanizadas, estabelecendo um contraste definitivo com os aterros, que geralmente estão em regiões afastadas e livres dos olhos da sociedade.

Como a maioria das plantas WTE em operação do mundo estão localizadas em áreas urbanas, atendendo critérios como proximidade ao gerador de RSU, aos consumidores industriais de vapor, a conexão com redes elétricas e fontes hídricas; há forte aplicação de noções de arquitetura e paisagismo para que essas plantas estejam esteticamente agradáveis e atraiam visitantes, como a Planta WTE Isseane, localizada a 5 quilômetros da Torre Eiffel em Paris, na França.

4.2.1. Fosso de Resíduos

Onde serão despejados os resíduos pelo caminhão de transporte. O fosso fica sobre pressão negativa impedindo que os odores sejam sentidos pelas regiões vizinhas quando a porta é aberta, e o ar captado será usado para combustão dentro das caldeiras. Seu tamanho varia de acordo com a capacidade anual de processamento.

4.2.2. Câmara de Combustão

O coração da planta WTE, tem uma grelha que varia de 3 a 13 metros dependendo da capacidade de processamento estabelecida, e um comprimento de aproximadamente 8 metros. A velocidade de rolagem é tal que o período de permanência dos sólidos dentro da fornalha é de 1 hora e os mesmos, dentro desse período, são expostos a altas temperaturas (entre 950° e 1100°C) e tem seus tamanhos reduzidos a cinzas. Posteriormente são descarregados do outro lado da fornalha, conforme ilustra a figura 19.



Figura 19 - Esquema de Câmara de Combustão; Fonte: Guidebook for the application of waste to energy Technologies in Latin America and other developing regions

4.2.3. Recuperação de Energia

A composição do RSU interfere totalmente na energia recuperada e, anterior a isso, na viabilidade do projeto. Portanto, o poder calorífico inferior (PCI) do resíduo, a eficiência da fornalha e se a energia é utilizada tanto para geração de eletricidade quanto de calor interferem na funcionalidade e viabilidade da planta. Quanto maior a capacidade de processamento da usina, melhores são esses índices, uma vez que a perda na fornalha é diminuída e a eficiência térmica da turbina é aumentada.

4.2.4. Sistema de Controle de Emissões de Poluentes

O projeto deveria compreender os padrões de qualidades do ar dispostos na resolução CONAMA N°491, de 19 de novembro de 2018, que estabelecem as emissões máximas aceitáveis para cada poluente na atmosfera.

Usinas WTE tem suas emissões comparadas à outras fontes de energia elétrica, porém, o destino do resíduo ao tratamento energético equivale a não destinação do mesmo a aterros, que emitem metano na atmosfera – poluente muito mais potente que o dióxido de carbono como agente responsável pelo efeito estufa. Sendo assim, as plantas de recuperação energética de resíduos

contribuem para reduções líquidas de emissões de gases do efeito estufa para cada MWh gerado ou tonelada de resíduo processado.

Os sistemas de controle de emissões utilizados pelas plantas que já estão em operação configuram entre os mais modernos do mundo e tem sua eficiência comprovada.

Tabela 6 - Tecnologias de Controle de Emissões

Parâmetro	Tecnologia de Redução Usada
Sólidos Suspensos	Ciclones
	Precipitador Eletrostático (úmido-seco)
	Filtro Mangas
Gases Ácidos	Sorção à Seco
	Sorção Semi-Seca
	Removedores a Úmido
Óxidos de Nitrogênio	Redução não-Catalítica Seletiva
	Redução Catalítica Seletiva

São utilizados os procedimentos de medição direta, cálculo de parâmetros adjacentes (indiretos), balanço de massa e fatores de emissão, assim como outros cálculos particulares de cada instalação, para realização do monitoramento dessas emissões.

4.2.5. Cinza da Planta WTE

Os resíduos gerados pelas plantas de recuperação energética de resíduos são as cinzas de fundo e as cinzas suspensas, que correspondem a 20-25% do peso do RSU e a 2-3% desse peso, respectivamente. Devido ao sistema de controle de poluição ambiental aplicado no projeto, esses rejeitos da combustão em grelha (que reduz o volume do RSU depositado em 90%) são quimicamente inertes. Entretanto, não há alternativas comerciais para o uso benefício dessas cinzas. De toda forma, utilizando a saída encontrada pelos EUA, as cinzas de fundo combinadas às cinzas suspensas, depois de passarem por processos de separação magnética e de Eddy-current para retirada de partículas ferrosas e não-ferrosas, podem ser utilizadas para cobertura diária dos aterros.

Estudos para a aplicabilidade da cinza de fundo estão feitos ao redor do mundo e demonstram que existe um futuro para esse rejeito. Por terem concentração de cloro e enxofre muito baixa e não apresentarem dioxinas e metais voláteis em sua composição, as cinzas de fundo podem ser utilizadas na construção de estradas e manejo de minas extintas, como tem sido feito por diversos países. Há, também, programas experimentais sendo realizados nos EUA que provam que a cinza de fundo pode ser processada para geração de um agregado ambientalmente seguro para diversas aplicações na construção civil. Outro exemplo, dessa vez aplicado nas Bermudas, é a mistura desse combinado de cinzas do processo com cimento, para formação de blocos de concreto que serão utilizados para proteção e aterro da costa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Aspectos Econômicos da Recuperação Energética de Resíduos

Atualmente, as plantas WTE são equipadas com os mais avançados sistemas de combustão e de controle de emissões de poluentes e, visto que são exigidos 90% de disponibilidade, resultando em 8.000 horas de atividade no período de um ano, juntamente com uma arquitetura que torne o empreendimento esteticamente agradável, o investimento em um projeto de recuperação energética tem valor bem elevado se comparado à construção de aterros sanitários.

Entretanto, e diferente dos aterros, as usinas de recuperação energética do RSU trazem benefícios significativos para a comunidade que o recebe durante a fase de construção, na fase de operação e ao longo dos anos depois que o investimento foi pago, ou seja, há retorno de capital e ganho de receita com o projeto.

É esperado o retorno de capital num período de 20 anos. A literatura disserta que 20 anos também seriam a vida útil de uma planta WTE, porém a experiência apresentada nas plantas ao redor do mundo aponta para 40 anos ou mais de vida útil. Dessa forma, chegou-se à conclusão de que uma planta, no decorrer dos anos, pode ser mantida e melhorada, tornando-se um bom negócio para a geração atual e um legado para as gerações futuras (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

O projeto pode ser viabilizado pelo órgão governamental responsável, sendo assim de propriedade pública; por parcerias público-privado (PPP) ou ser inteiramente de propriedade privada. Para os três cenários estão envolvidos estudos que dimensionem os custos de capital inicial, os custos operacionais e a receita esperada com a instalação.

O investimento inicial inclui os custos com o terreno, a construção da planta, serviços e outras obras de infraestrutura que possam estar atreladas ao projeto, como estradas de acesso por exemplo. Esse custo de capital inicial varia de acordo com a localidade do projeto e leva em consideração o fato de que as tecnologias de combustão, em sua maioria, são adquiridas de fornecedores estrangeiros, sendo assim é necessário o entendimento dos riscos de câmbio envolvidos nesse processo.

A disponibilidade da planta faz total diferença para o retorno do custo de capital inicial investido, uma vez que são esperados paradas programadas e interrupções de curta duração para manutenção de algum equipamento. Ou seja, quanto menor for o tempo de atividade da planta durante o ano maiores são os custos de capital por tonelada de RSU processado.

Em fase de operação a planta arcará com os custos dos produtos químicos utilizados no processo (areia, cal, carbono ativado), da manutenção dos equipamentos, do manuseio e disposição das cinzas de fundo e suspensas, dos tentes ambientais para monitoramento das emissões, do seguro da planta e os custos com os funcionários, além de outros custos variáveis que possam aparecer.

A receita do projeto será produto das seguintes fontes de renda:

- **Taxa de Despejo:** Valor cobrado em cima da tonelada de RSU que será processado na usina de recuperação energética. Essa taxa de disposição de resíduos é similar a taxa de despejo cobrada pelos aterros sanitários, porém de valor elevado. Entretanto, pautas sustentáveis estão ganhando mais importância no cenário internacional e a tendência é que surjam incentivos para escolha do tratamento energético de resíduos em vez da disposição dos mesmos em aterros. Essa taxa, como acontece em alguns países, é paga pelos cidadãos da mesma forma como são pagos serviços de eletricidade e água.
- **Eletricidade e Vapor:** Produtos do processo de recuperação energética tem sua venda como principal ativo da receita do empreendimento. Vale destacar que a escolha de um local próximo a zonas industriais facilita a destinação do vapor gerado, que, no Brasil, são geralmente consumidos por indústrias alimentícias ou químicas. O planejamento de venda desses dois produtos gerados no processo viabiliza a construção da planta.
- **Créditos de Carbono:** Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), os Certificados de Redução de Emissões (CRE) são utilizados no mercado de carbono. Consiste, basicamente, em compensação financeira a cada tonelada de dióxido de carbono captura, que deixa

de ser emitido para a atmosfera. Atualmente existem fundos de investimentos que aplicam em crédito de carbono, que surgiram aliados a aspectos ambientais, sociais e de governança (ESG) no Brasil e devem ser levados em consideração na hora do cálculo da receita esperada. Os valores dos créditos de carbono negociado variam de acordo com alguns fatores, mas para esse setor o mercado atualmente está aquecido com bastante potencial de crescimento. Em julho de 2021, por exemplo, a tonelada de CO₂ estava sendo negociada a € 50, o dobro do ano anterior (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

- **Outras receitas:** Venda dos metais ferrosos e não ferrosos recuperados das cinzas de fundo da planta WTE. Pode ser recuperado aproximadamente 50% dos metais ferrosos e 8% dos metais não ferrosos (Themelis, Barriga, Estevez, Velasco, 2013).

Possíveis riscos associados a implantação e operação de uma usina de recuperação energética surgem relacionados à necessidade de se ter um fluxo contínuo de entrada de resíduos de características similares. Não é possível estabelecer uma projeção segura para a geração de RSU nos próximos 20 ou 30 anos e a solução que pode ser adotada de forma a mitigar esse risco são campanhas contra a utilização de aterros e políticas pública que incentivem a adoção de métodos mais modernos para gestão segura e sustentável dos resíduos sólidos urbanos.

Atrelado ao risco citado no parágrafo anterior está a ideia de se combinar recuperação energética de resíduos com reciclagem. Ao contrário da perspectiva do senso comum, a adoção de métodos de recuperação energética, através da construção de plantas WTE, resulta no aumento das taxas de reciclagem da comunidade localizada no perímetro da planta. No planejamento do projeto deve-se incluir o estabelecimento ou melhora da reciclagem formal de resíduos, de modo a garantir RSU de características semelhantes e alto poder calorífico que serão despejados no fosso de resíduos da usina. Dessa forma, é de interesse do projeto ter pelo menos uma unidade de reciclagem de materiais nas proximidades do local, coletando o RSU e, mecânica ou manualmente,

separando-os em materiais comerciáveis e materiais que serão destinados a planta Waste-To-Energy.

A adoção de um projeto de recuperação energética de resíduos trará benefícios à área em que ele foi implantado, resultando no crescimento econômico da região, trazendo novas oportunidades de emprego e capacitação nos setores de energia e resíduos, visto que há transferência de know-how e desenvolvimento de novas estruturas industriais. O projeto também soma na questão da independência energética e condições ambientais, uma vez que contribui para o aumento da produção de energia de fontes renováveis, preservando recursos naturais, reduzindo emissões atmosféricas e preservando espaços destinados a aterros, já que a adoção de métodos WTE de gestão de resíduos resulta na diminuição da utilização de métodos ultrapassados.

5.2. Estudo de Caso – Barueri – SP, Brasil (URE)

Localizada a aproximadamente 26 km da cidade de São Paulo, a cidade de Barueri tem em torno de 246 mil habitantes e uma população flutuante em torno de 170 mil pessoas. A cidade, entre as 10 com as maiores populações do Brasil, direciona 100% do resíduo sólido gerado para coleta seletiva (Santos, 2016).

Visto que o centro para tratamento de RSU situa-se a 20 km do centro da cidade, em 2010 a prefeitura de Barueri fechou uma parceria público-privada com a FOXX Consortium para construir uma usina de recuperação energética para funcionamento dentro de um período de 30 anos.

A primeira unidade de tratamento térmico de resíduos do Brasil ainda está em fase de construção. Depois de pronta espera-se que a URE processe 870 toneladas de RSU diariamente, gerando 20 MW de energia elétrica, equivalendo ao abastecimento de aproximadamente 80 mil residências.

5.3. Estudo de Caso – Buenos Aires, Argentina

5.2.1. Dados sobre o país

A Argentina tem uma população de 40 milhões de habitantes. Na região que se localiza Buenos Aires está concentrada aproximadamente 36% da população do país (14,3 milhões de habitantes) e uma geração de aproximadamente 300 kg per capita de resíduos por ano. A reciclagem é praticada, em sua maioria, de forma informal pelos “cartoneros”, que recolhem os materiais recicláveis das ruas, e por “cirujas” que coletam os recicláveis

diretamente dos aterros. A cidade de Buenos Aires paga a CEAMSE (Coordinación Ecológica del Área Metropolitana Sociedad del Estado) uma taxa de despejo de resíduos em aterro sanitários de U\$ 15,00/t.

5.2.2. Capacidade da Planta

Planta de 3 linhas com capacidade de processamento de 3000 toneladas de resíduos por dia e disponibilidade de mais de 90%, processando 1 milhão de toneladas anuais de resíduos sólidos urbanos. A geração líquida de eletricidade é estimada em 0,6 MWh/t, resultando em 604.800 MWh (seiscentos e quatro mil e oitocentos) anualmente.

5.2.3. Local de Instalação

O projeto será instalado no aterro Norte III, devido à expectativa de atingir sua capacidade plena e à necessidade de adotar medidas de gestão de resíduos mais modernas, já que a região metropolitana de Buenos Aires não tem condições de receber a instalação de mais um aterro.

5.2.4. Custos Projetados

- **Custo de Capital:** U\$ 600.000.000, sendo U\$ 575 por tonelada de RSU.
- **Custo Operacional:** U\$ 32.000.000 anuais, sendo U\$ 31,8 por tonelada de RSU processado.
- **Receita:**
 - Eletricidade: U\$ 61.000.000 anuais, sendo U\$ 61 por tonelada de RSU.
 - Taxa de Despejo: U\$ 20 por tonelada de RSU despejado.
 - Crédito de Carbono: O fator de emissão – utilizado para cálculo das receitas com CRE – na Argentina é 0,481 por tonelada de dióxido de carbono. Na época do estudo o valor dos créditos por tonelada de CO2 capturado era de U\$ 16, resultando numa receita de U\$ 7.700.000 anuais.
 - Recuperação de Metais: U\$ 960.000 anuais, U\$ 0,96 por tonelada de RSU processado.

5.2.5. Conclusões

O projeto é necessário para a região metropolitana de Buenos Aires uma vez que não há mais terreno para construção de novos aterros e os que já

existem estão chegando aos limites sustentáveis de operação, porém não apresenta valores de taxa de despejo competitivos se comparados à aterros sanitários. Isso evidencia o fato de que é necessário a aplicação de políticas públicas que permitam a viabilidade do projeto assim como reforçar programas de reciclagem e compostagem, elevando o município na hierarquia da gestão sustentável de resíduos.

6. CONCLUSÕES

A experiência de gestão de resíduos aplicada atualmente em solo brasileiro somada a inúmeros estudos feitos a respeito da inserção de novos métodos de processamento de RSU no plano de gestão de resíduos sólidos de países europeus, norte-americano e asiáticos evidencia que alternativas aplicadas visando a adaptação a um cenário onde há um crescimento populacional e, conseqüentemente, de consumo de bens e serviços cada vez mais acelerado, será necessária, já que o crescimento desses setores resulta no aumento da geração de resíduos sólidos urbanos a serem destinados.

Para o cenário brasileiro seria necessário obter cada vez mais espaço que atenda as dimensões dos aterros sanitários para disposição dos resíduos gerados, e esse processo está cada vez menos sustentável, visto que não traz retorno do capital investido, financeira ou socialmente.

As tecnologias tratadas nesse estudo estão sendo aplicadas em países ao redor de mundo como uma solução a essa demanda que tende a crescer cada vez mais com o passar dos tempos, com finalidade de tirar o máximo proveito do produto comercializado, aumentando o ciclo de vida do mesmo e contribuindo para o que é chamado de economia circular.

Aplicação de métodos modernos para disposição e tratamento de resíduos, como o processo de combustão em grelha, são necessários ao plano de gestão de resíduos que se tem atualmente no Brasil. A implantação de plantas WTE ao redor do perímetro do país contribui para a redução do número de aterros utilizados e aumento da taxa de reciclagem, conforme mostra a experiência tradicional. A pirâmide hierárquica da gestão de resíduos é seguida de forma mais criteriosa deixando a destinação em aterros como última opção de destinação, somente para os resíduos que de fato não puderam ser tratados com as metodologias anteriores da hierarquia.

Apesar dos benefícios apresentados, para que a instalação de uma planta WTE seja economicamente viável no Brasil seria necessário incentivo do governo, atuando em parcerias público-privadas que possibilitem taxas de despejo competitivas com o mercado, tornando o empreendimento atrativo e fortalecendo a reciclagem de modo a prover um volume de RSU com alto poder calorífico, aumentando a eficiência energética da planta.

A gestão sustentável de resíduos deve estar no topo da lista de projetos essenciais de infraestrutura, como acesso à água potável, energia elétrica e saneamento básico e, em relação as tecnologias de recuperação energética de resíduos, é necessário o entendimento de que mesmo não sendo economicamente viável na perspectiva de curto prazo para o investidor privado, pode ser um bônus econômico na perspectiva de longo prazo de uma nação, uma vez que acarreta na geração de empregos para construção e operação de uma planta WTE, adição de uma fonte local de geração de energia e, se comparada a aterros, garante conservação de terra e diminuição das emissões atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IPEA - CENTRO DE PESQUISA EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE.

Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. 2020. Disponível em <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acessado em 17.Mai.2021.

MEU RESÍDUO. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** 2020.

Disponível em <<https://meuresiduo.com/geral/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-edicao-2020/>>. Acessado em 4.Jun.2021.

SENADO FEDERAL. **Aumento da produção de lixo tem custo ambiental.**

Disponível em <<https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/residuos-solidos/mundo-rumo-a-4-bilhoes-de-toneladas-por-ano>>. Acesso em 18.Jun.2021.

EOS CONSULTORES. **Os números dos resíduos sólidos no mundo.** 2018.

Disponível em <<https://www.eosconsultores.com.br/os-numeros-dos-residuos-solidos-no-mundo/>>. Acessado em 11.Nov.2020.

THE WORLD BANK. **Não desperdice, não queira – resíduos sólidos no coração do desenvolvimento sustentável.** 2016. Disponível em <

<https://www.worldbank.org/pt/news/feature/2016/03/03/waste-not-want-not---solid-waste-at-the-heart-of-sustainable-development>>. Acessado em 7.Mar.2021.

IBGE. **População do Brasil.** Disponível em

<<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acessado em 13.Set.2021.

IEA. **World Energy Balances.** 2020. Disponível em <

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4->

418625c2c9d7/World_Energy_Balances_Overview_2020_edition.pdf>.
Acessado em 22.Set.2021.

SEEG BRASIL. **Total Emissions**. Disponível em
<https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#>. Acessado em 27.Ago.2021.

CEWEP. **Confederation of European Waste-to-Energy Plants**. Disponível
em <cewep.eu>. Acessado em 03.Out.2021.

Diário Oficial da União. Brasil. CONAMA. 21 de Novembro de 2018.
RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018, Brasil, 2018.
Disponível em <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895>. Acesso em
10.Out.2021.

CETESB. **Padrões de Qualidade do AR**. Disponível em <
<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acessado em
10.Out.2021.

CETESB. **Emissões de metano aceleram aquecimento global mais que o CO₂**. 2016. Disponível em
<<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2016/12/13/emissoes-de-metano-aceleram-aquecimento-global-mais-que-co2/>>. Acessado em 10.Out.2021.

Del Caro, Luciana. **Apostas em crédito de carbono animam o mercado**.
2021. Disponível em
<<https://valor.globo.com/publicacoes/suplementos/noticia/2021/08/12/apostas-em-credito-de-carbono-animam-o-mercado-sembarreira.ghtml>>. Acessado em
19.Out.2021.

OLIVEIRA JUNIOR, D. L. **PIRÓLISE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS VISANDO À OBTENÇÃO DE PRODUTOS DE ALTO VALOR AGREGADO**. Santa Maria, RS. 2016.

ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**. 2018/2019.

THEMELIS, N. J. BARRIGA, M. E. D. ESTEVEZ, P. VELASCO, M. G.
**GUIDEBOOK FOR THE APPLICATION OF WASTE TO ENERGY
TECHNOLOGIES IN LATIN AMERICA AND OTHER DEVELOPING
REGIONS**. Earth Engineering Center, Columbia University. Julho, 2013.

MA, J. ZHONG, Q. **COMPARISON OF CHINESE PYROLYSIS PROCESSES**.
Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.
December, 2018.

SANTOS, P. E. B. **LEGAL ASPECTS OF INTRODUCING WASTE-TO-
ENERGY (WTE) TECHNOLOGY IN SAO PAULO STATE OF BRAZIL: THE
CASE STUDIES OF URE BARUERI AND CITY OF SAO PAULO**. Department
of Earth and Environmental Engineering, Columbia University. 30 de Abril de
2016.

ABREN. **URE Barueri é a mais nova associada da ABREN**. 2021. Disponível
em <<https://abren.org.br/en/2021/08/02/ure-barueri-e-a-mais-nova-associada-da-abren/>>. Acessado em 21.Nov.2021.