

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

AURORA DE OLIVEIRA GUATTA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA DOS RESÍDUOS ENCAMINHADOS AO ATERRO
SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE MARINGÁ-PR POR MEIO DA
TECNOLOGIA WASTE-TO-ENERGY**

CAMPO MOURÃO

2021

AURORA DE OLIVEIRA GUATTA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA DOS RESÍDUOS ENCAMINHADOS AO ATERRO
SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE MARINGÁ-PR POR MEIO DA
TECNOLOGIA WASTE-TO-ENERGY**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Thiago Morais de Castro

CAMPO MOURÃO

2021

AURORA DE OLIVEIRA GUATTA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS
RESÍDUOS ENCAMINHADOS AO ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE
MARINGÁ-PR POR MEIO DA TECNOLOGIA WASTE-TO-ENERGY**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 04 de maio de 2021

Maria Cristina Rodrigues Halmeman
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Real Prado
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Morais de Castro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2021

AGRADECIMENTOS

Diante desta conquista em minha vida quero primeiramente agradecer Deus, Ele que é o motivo de todas as minhas alegrias, quem me sustentou nos dias de dificuldade: “Amo o Senhor, porque ele ouviu a voz da minha súplica, porque inclinou para mim seus ouvidos no dia em que o invoquei” (Salmo 114).

Agradeço grandemente a todos os que foram sustento durante esta trajetória, a minha família, aos meus pais Izaura e Claudio, em especial minha mãe, por todos os conselhos, ensinamentos e orações, que foram a base para que eu tomasse as escolhas corretas.

Sou grata por todos os meus colegas que esta jornada me apresentou, em especial a Ana Beatriz, Lucas e Angélica, amigos que levarei para a vida os quais compartilhamos conselhos, ajudas, orações e principalmente muitas risadas.

Agradeço também a João Victor, um grande presente neste período, quem me apoiou, me deu forças e esteve comigo nos momentos em que mais precisei.

Gostaria de agradecer ao Grupo Santa Gemma Galgani, o grupo de oração universitário que participei durante estes anos, um grande sustento da minha fé e que me proporcionou momentos e pessoas maravilhosas.

Agradeço a empresa júnior Habitat Consultoria Ambiental, em especial meus colegas da Direx 2018, pois tive o grande privilégio de aprender muito com esta equipe, tanto como profissional quanto como pessoa, com certeza uma experiência que me fez crescer muito.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador Thiago Morais de Castro, pelo incentivo e pela dedicação em ambos os projetos orientados, profissional que tenho admiração e com certeza um dos meus maiores exemplos de engenheiros ambientais.

Quero agradecer a cada um dos professores do meu curso pelo apoio e pela elevada qualidade do ensino oferecido.

Agradeço a empresa A2A Ambiente pela oportunidade de estágio e todo conhecimento proporcionado, em especial a equipe que me orientou, formada por Elena Maggioni, Chiara Boccinger, Marco Farina e Valentina Bifulco, e um agradecimento especial também a Annalisa Bianchetti.

RESUMO

A disposição final dos resíduos sólidos é um grande desafio principalmente nos centros urbanos, devido a sua crescente geração, consequência inevitável das atividades realizadas pela sociedade. Como consequência, existe a necessidade de um tratamento adequado. Quando não realizado ou feito de maneira incorreta, tais resíduos causam prejuízos diretos para a população e ao meio ambiente. Além disso, resulta em desperdício energético, considerando que grande parte deste material é passível de reaproveitamento e geração de lucro. Diante deste cenário, este estudo teve como objetivo estimar o potencial de geração de energia elétrica utilizando os resíduos que atualmente são encaminhados ao aterro sanitário por meio da implantação de uma usina *Waste-to-Energy* (WTE) no município de Maringá-PR. A pesquisa foi baseada na metodologia utilizada pela empresa A2A Ambiente, localizada na região norte da Itália, a qual é responsável por todas as etapas da gestão de resíduos, inclusive pelo controle da usina *Silla 2*. Após a obtenção dos dados referentes à Maringá, foi estimado o potencial calorífico inferior (PCI) dos resíduos que são encaminhados ao aterro sanitário, característica fundamental para determinar a viabilidade da utilização da tecnologia para a geração de energia. Embora os valores tenham atingido de 2.109,49 kcal/kg relacionado a um total de 114.662,96 toneladas de resíduos encaminhados ao aterro sanitário em 2020, atendendo ao mínimo de 2.000 kcal/kg, verificou-se a possibilidade de aumentar este potencial com adoção de um pré-tratamento, considerando que grande parcela do resíduo maringaense é composta pela fração orgânica. Foi proposta então uma etapa de biossecagem, no qual reduziu a quantidade e a proporção de resíduo orgânico, conseqüentemente aumentando o valor do PCI para 2.584,41 kcal/kg. Após tais etapas, calculou-se a média estimada de geração de energia elétrica e assim realizada as demais análises. Diante destes resultados, verificou-se o potencial apresentado pelo município e relacionou-se com a realidade europeia. Verificou-se a necessidade que realidade brasileira possui em adotar medidas efetivas e ambientalmente corretas para o tratamento de seu resíduo, garantindo que ocorra a economia circular.

Palavras-chave: gestão de resíduos; aproveitamento energético de resíduos; *waste-to-energy*.

ABSTRACT

The final disposal of solid waste is a major challenge, especially in large urban centers, due to its growth, an inevitable consequence of the activities made by society. As a consequence, there is a need for proper treatment. When not done or done incorrectly, such waste causes direct damage to the population and the environment. In addition, it results in waste of energy, considering that a large part of this material is subject to valorization and profit generation. Given this situation, this study intended to estimate the potential generation of electric energy using the waste that is currently sent to the landfill through the implementation of a Waste-to-Energy plant in the city of Maringá-PR. The research was implemented taking as a reference the methodology used by the company A2A Ambiente, located in the northern of Italy (Lombardy region), which is responsible for waste management value chain, from the collection stage to disposal one including the management of Waste-To-Energy power plants, such as Silla 2 plant in Milan. After obtaining informations about the Maringá waste, the Lower Heating Value of the waste that is sent in the landfill was estimated, a fundamental characteristic to determine the feasibility of using the WTE for the generation of energy. Although the values have reached the required minimum of 2109,49 kcal / kg related to a total of 114.662,96 tons of waste sent to the landfill in 2020, it was possible to increase this potential through a pre-treatment, considering that a large portion of the Maringá waste is composed of the organic fraction. For this purpose, a biological mechanical treatment step was proposed, for reducing organic waste and consequently increasing the value of the Lower Heating Value to 2584,41 kcal / kg. After such steps, was calculated the estimated capacity of plant and was made the other analyzes. In view of these results, the potential presented by the city in the use of this technology was verified and was comparable to the European reality. It was verified the need that the Brazilian reality has to adopt effective and environmentally correct measures for the treatment of its waste, ensuring that the circular economy occurs.

Keywords: waste management; energy use of waste; waste-to-energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia dos resíduos	13
Figura 2 - Estrutura de um Aterro Sanitário.....	14
Figura 3 - Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e seus respectivos produtos finais	17
Figura 4 - Proporções de Cogeração de Energia produzida no sistema <i>Waste-to-Energy</i>	18
Figura 5 - Estrutura de uma usina WTE	19
Figura 6 - Porcentual da destinação final dos resíduos sólidos urbanos em alguns países da Europa, em 2019	22
Figura 7- Quantidade de usinas <i>Waste-to-Energy</i> na Europa, em 2018	23
Figura 8 - Esquema Simplificado de um sistema de Tratamento Mecânico Biológico com Biossecagem	28
Figura 9 - Mapa de localização do município de Maringá-PR.	29
Figura 10 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos encaminhados ao Aterro sanitário de Maringá-PR	33
Figura 11 – Economia Circular e a Gestão de Resíduos em Milão, Itália.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de resíduos coletados pela coleta convencional em Maringá-PR	34
Tabela 2 - Quantidade de resíduos e rejeitos gerados nas cooperativas de reciclagem	35
Tabela 3 - Classificação e quantidade de resíduos encaminhados ao aterro sanitário de Maringá - PR em 2020	37
Tabela 4 – Estimativa dos valores médios dos PCI dos resíduos	38
Tabela 5 - Valores do poder calorífico inferior (PCI) do resíduo encaminhado ao aterro sanitário de Maringá-PR de 2020	39
Tabela 6 - Poder calorífico inferior (PCI) do resíduo da coleta convencional de Maringá-PR de 2020	40
Tabela 7 – Composição e média anual da quantidade de resíduos na entrada do pré-tratamento	42
Tabela 8 – Composição e média anual da quantidade de resíduos após o pré-tratamento	42
Tabela 9 – Estimativa do poder calorífico inferior (PCI) do resíduo de Maringá-PR após a biossecagem	43
Tabela 10 – Potência elétrica disponibilizada através dos resíduos de Maringá-PR	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo Geral.....	10
2.2 Objetivos Específicos	10
3 JUSTIFICATIVA	11
4 REVISÃO DE LITERATURA	12
4.1 Resíduos Sólidos	12
4.2 Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos	14
4.2.1 Aterro Sanitário	14
4.2.2 Incineração	15
4.3 Aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos	16
4.4 Waste-to-Energy	17
4.4.1 Tratamento de Emissões Atmosféricas das Usinas <i>Waste-to-Energy</i>	23
4.4.2 Legislação para Usinas Waste-to-Energy no Brasil	24
4.5 Tratamento Mecânico Biológico	26
5 MATERIAL E MÉTODOS	29
5.1 Área de Estudo	29
5.2 Coleta e tratamento de dados	30
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
6.1 Panorama dos Resíduos Sólidos de Maringá-PR.....	33
6.1.2 Waste-to-Energy em Maringá-PR	35
6.2 Resíduos destinados ao aterro sanitário de Maringá-PR	36
6.3 Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos	37
6.4 Tratamento Mecânico Biológico	41
6.5 Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica.....	44
6.6 Melhorias no sistema de gestão de resíduos de Maringá-PR	48
7 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A - VALORES MÉDIOS DOS PCI DOS RESÍDUOS	62

1 INTRODUÇÃO

Dentre as atividades do saneamento ambiental municipal, abrangem-se a gestão, o gerenciamento e o manejo dos resíduos sólidos, desde o esforço para a não geração, coleta, acondicionamento, tratamento até a disposição final. Dentre tais etapas, um dos maiores desafios é a disposição final, considerando que uma má gestão é consequentemente responsável por causar degradação ambiental da paisagem urbana e dos recursos naturais (GOUVEIA, 2012).

Conforme os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2019), no Brasil estima-se que são geradas 216.629 mil toneladas de resíduos sólidos diariamente, sendo a geração per capita de aproximadamente 1,039 kg/ (habitante.dia). Considera-se que, quanto à destinação final, 59,5% dos resíduos são encaminhados para aterros sanitários, 23% para aterros controlados e 17,5% para lixões. Percebe-se que 40,5% dos resíduos são destinados em locais com pouco ou nenhum tratamento adequado (lixões e aterros controlados).

Na busca pela mudança da situação na gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), e considerando alguns elementos como o crescimento populacional, urbanização, mudanças climáticas e esgotamento dos recursos naturais, aos poucos têm surgido a tendência de enxergar os resíduos como uma alternativa de recurso energético (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS, 2020).

Uma destas opções é a tecnologia conhecida como *Waste-to-Energy* (WTE), que refere-se a um tratamento por meio da incineração dos resíduos sólidos, sendo um processo de decomposição térmica, que aproveita o poder calorífico dos materiais através da queima, gerando energia elétrica e térmica, além de reduzir peso, volume e características de periculosidade com a eliminação de matéria orgânica e patogenicidade. Cada vez mais, ao longo dos últimos anos, vem ocorrendo uma evolução neste processo de destinação final dos resíduos sólidos, principalmente em países desenvolvidos, como por exemplo, na Itália, França, Japão (ITÔ, 2014). Considerando a problemática exposta, este estudo tem como objetivo estimar, por meio da tecnologia WTE, o potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos coletados pelo serviço público do município de Maringá-PR e destinados ao aterro sanitário do referido município.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos atualmente destinados ao aterro sanitário do município de Maringá-PR, por meio da tecnologia *Waste-to-energy* (WTE).

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar o poder calorífico dos resíduos destinados ao aterro sanitário do município com base em dados anuais recentes;
- Analisar a viabilidade técnica do encaminhamento dos resíduos sólidos para a utilização na tecnologia WTE;
- Comparar os poderes caloríficos inferiores entre o resíduo com e sem pré-tratamento;
- Sugerir melhorias e soluções para a gestão e tratamento dos resíduos sólidos urbanos de Maringá, utilizando como referência a cidade de Milão, Itália.

3 JUSTIFICATIVA

Considerando as dificuldades que existem nas cidades, em relação a grande quantidade e variedade de resíduos sólidos gerados, é evidente que este problema se destaca principalmente quanto a sua destinação final. Em uma grande parcela das cidades brasileiras, esta etapa da gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ocorre em locais despreparados, gerando impactos ambientais e riscos a saúde pública, ou seja, em aterros controlados e lixões. Porém, até mesmo nos locais considerados apropriados, os aterros sanitários, o potencial destes materiais para a geração de energia e conseqüentemente os benefícios econômicos e ambientais são subaproveitados.

Sendo assim, existe a necessidade da realização de pesquisas no Brasil, buscando tecnologias mais eficientes para o tratamento e reaproveitamento destes materiais. Além disso, com os crescentes volumes de RSU, tendem a cada vez mais consumir um espaço de aterro que é finito. Deve-se considerar também que a disposição dos resíduos em aterros sanitários não é suficiente para a redução das emissões atmosféricas. Portanto, tecnologias como a *Waste-to-Energy* (WTE) auxilia a aliviar a carga sobre estas destinações. Considerando este ponto, o estudo será realizado tendo como referência a cidade de Milão, na Itália, devido o acesso às informações com a empresa responsável pela gestão, além de ser referência quanto à gestão de resíduos.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Resíduos Sólidos

De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são materiais derivados de atividades humanas cujo seu estado final é sólido ou semissólido. São incluídos também gases e líquidos que o tratamento na rede pública de esgoto ou nos corpos d'água é inviável. Já os resíduos sólidos urbanos (RSU) abrangem apenas aqueles domiciliares e os originados da limpeza urbana (BRASIL, 2010).

Cada tipo de resíduo possui características que irá determinar a melhor maneira que ele deve ser manuseado, acondicionado, transportado e tratado, como a origem, natureza física, composição química e pelos riscos potenciais ao meio ambiente (COPERAÇÃO PARA A PROTEÇÃO DO CLIMA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, 2018).

No Brasil a maioria dos RSU são geralmente encaminhados para a disposição final em aterros sanitários, o qual na maioria das vezes sua gestão é de responsabilidade do poder público municipal (BRASIL, 2020).

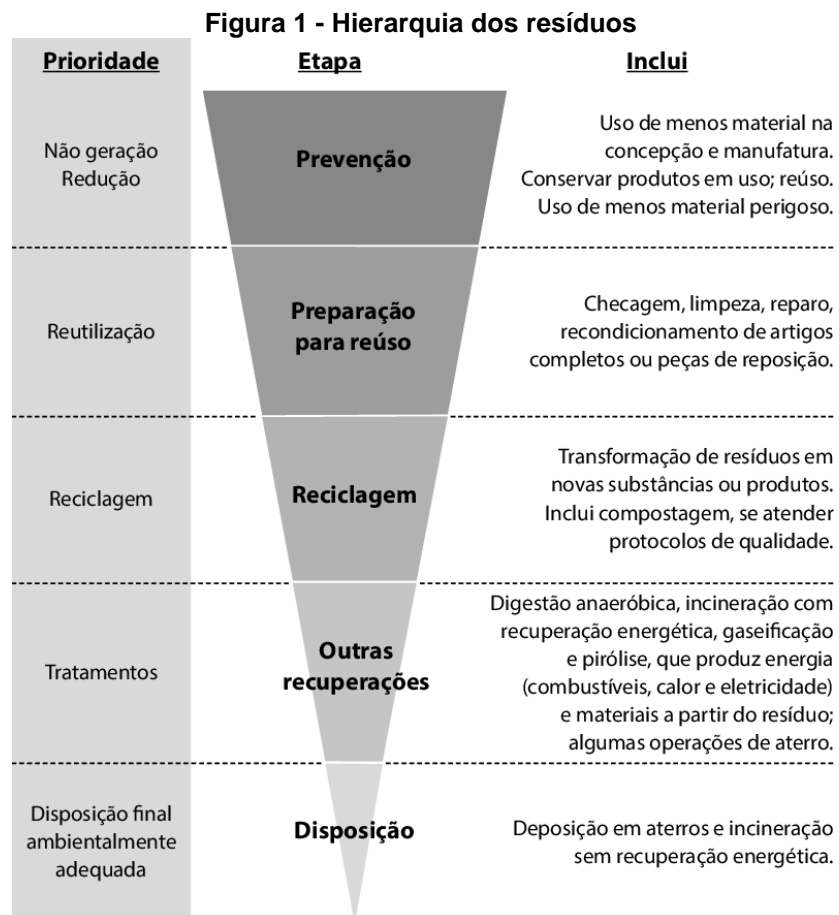
Quanto à legislação, a gestão dos resíduos sólidos conta principalmente com a Lei Federal nº 12.305/10, que institui a PNRS. Esta contém instrumentos que permite o avanço necessário em relação aos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. Estabelece a prevenção e a redução na geração de resíduos, propõe a prática de hábitos de consumo sustentável, o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos.

Além disso, traz a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, diversas metas, como a eliminação dos lixões, e instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal e metropolitano e municipal. Traz também a obrigatoriedade dos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para o setor privado em relação aos grandes geradores ou conforme lei estadual ou municipal específica (BRASIL, 2010).

Em comparação, a legislação italiana referente ao sistema de gestão de resíduos sólidos é representada Decreto nº152 de 3 de abril de 2006, o *Testo Unico Ambientale*. Esta normativa disciplina e regulamenta as atividades de todas as fases

da gestão de resíduos, estabelecendo objetivos, permitindo a estruturação do setor. Este tornou-se não apenas uma atividade de higiene ambiental e sanitária, mas também um setor industrial (FONDAZIONE PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE, 2017).

Outro marco em relação a este contexto foi a aprovação das quatro diretrizes da União Europeia a respeito da economia circular, conhecidas como *Pacchetto sull'economia circolare*. Estes consideram como princípio básico, conforme apresentado na Figura 1, a hierarquia dos resíduos, ou seja, a não geração primeiramente, a reciclagem, o aproveitamento energético através dos incineradores, e por fim a disposição final em aterros, o qual apresenta a meta que até 2035 não poderá superar os 10% do total produzido no país (MICHELON, 2018).



Fonte: Palermo; Gomes (2017)

Diante do embasamento nas legislações de ambos os países, percebe-se a importância da gestão dos resíduos sólidos e principalmente o seu destino final, sendo necessário seu aproveitamento da melhor maneira.

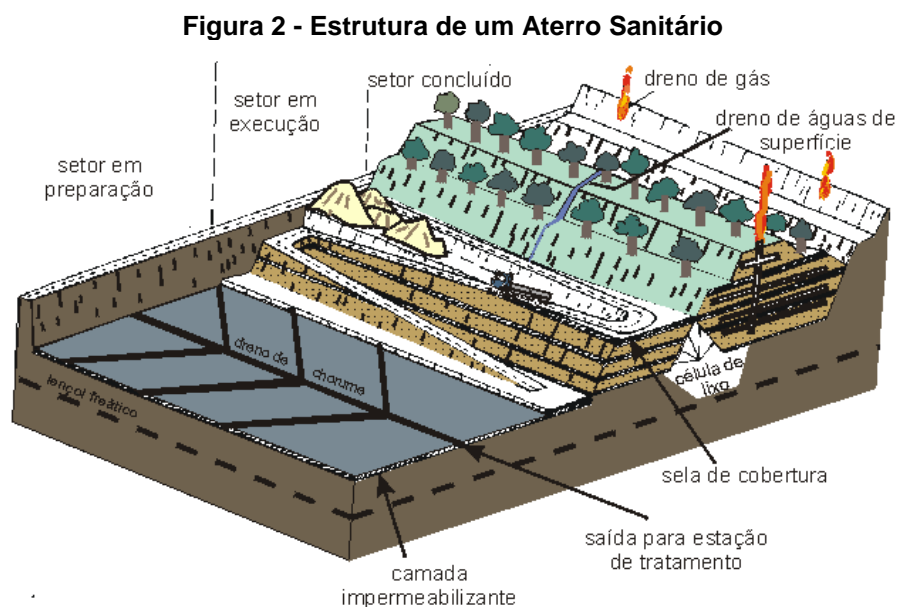
4.2 Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos

A etapa de destinação final dos RSU é apresentada como um grande desafio para as gestões municipais. Atualmente, no Brasil, 40,5% da destinação é feita em locais com pouco ou nenhum tratamento adequado, ou seja, os lixões e aterros controlados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2019). Porém existem diversas alternativas, dentre elas algumas ambientalmente viáveis, como por exemplo, a compostagem, a digestão anaeróbia, os aterros sanitários, a própria reciclagem e o aproveitamento energético dos resíduos. Neste estudo, será dado um enfoque ao aterro sanitário e a incineração.

4.2.1 Aterro Sanitário

O aterro sanitário, conforme a definição da NBR 8419/1992, é uma técnica de disposição dos resíduos sólidos o qual, através de princípios da engenharia, confina os resíduos e diminui o volume total, realizando a cobertura com camadas terra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). São obras destinadas à estocagem e armazenamento dos resíduos sólidos gerados pelos aglomerados urbanos (PORTELLA, RIBEIRO, 2014).

Na Figura 2 é apresentado um esquema de um aterro sanitário com as devidas estruturas necessárias para segurança ambiental.



Fonte: Naime (2012)

Tais obras funcionam como reatores dinâmicos que através de reações químicas e biológicas, produzem biogás e efluentes líquidos (lixiviado e húmus) (VAN ELK, 2007). Conforme a norma NBR 8419/1992 descreve a necessidade da impermeabilização da base e superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem do lixiviado e do biogás produzido, a construção de células especiais para os resíduos de serviço de saúde, além da elaboração de um manual de operação e descrição do uso futuro do terreno após o encerramento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). A construção dos aterros sanitários conta também com as determinações das normas NBR 13896/1997 e NBR 15849/2010. Neste processo, além da compactação e cobertura diária das células, são aplicados outros processos técnico-operacionais com objetivo de evitar a proliferação de vetores de doenças, exalação de mau cheiro, contaminação de lençóis freáticos e poluição visual (PORTELLA; RIBEIRO, 2014).

4.2.2 Incineração

Dentre os diversos tipos de tratamento térmico à alta temperatura, o mais difundido é a incineração, o qual ocorre através da combustão dos resíduos, gerando principalmente gás carbônico (CO_2), água e cinzas. Este processo ocorre em equipamentos específicos, que empregam ar como agente oxidante e operam a temperaturas acima de 850°C . Em países com pouca disponibilidade de área para aterros sanitários, vem apresentado um crescimento em relação a essa destinação final dos resíduos, principalmente devido aos sistemas de recuperação de energia e de tratamento de gases de combustão mais eficientes, sendo uma metodologia ambientalmente e economicamente viável, quando implantada de acordo com a legislação ambiental em vigor (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2018).

Conforme a referência citada anteriormente, para a eficiência da incineração, é necessário o seguimento de algumas condições, sendo elas: temperatura elevada na câmara de combustão, teor de oxigênio suficiente nos gases de combustão (mínimo de 6%), elevadas turbulências nos gases e tempo de residência na câmara de combustão (no mínimo 2 segundos). Além disso, é necessário um estudo criterioso do poder calorífico inferior (PCI) que, conforme Camacho et al. (2014) é a quantidade de calor desprendida durante a queima total do combustível, em

condições de pressão constante e total vaporização da água contida durante todo o processo. O PCI é calculado a partir da medição experimental do poder calorífico superior, e posteriormente, a remoção da parte do calor que é transferida para o processo de condensação da água contida no resíduo (BONOMI, 2000).

As principais vantagens desta tecnologia é a redução de massa e volume do resíduo descartado, a possibilidade de recuperação de energia, redução de impactos ambientais, eliminação dos vírus e bactérias, destruição completa ou parcial de substâncias tóxicas, complementação de outras formas de destinação final de resíduos, como a reciclagem e a compostagem. No entanto, a tecnologia traz alguns aspectos que necessitam de atenção e análise, sendo eles em relação aos elevados custos, exigência de mão de obra especializada e necessidade de tratamento dos resíduos gerados na combustão (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2018).

Utilizando a premissa básica da combustão e incineração, existem diversas tecnologias desenvolvidas que associam este tratamento ao aproveitamento energético através dos resíduos.

4.3 Aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos é uma das alternativas de tratamento, considerando tanto os aspectos ambientais quanto as oportunidades de negócios envolvidas. Durante o processo das diversas tecnologias existentes, como a queima do biogás e incineração, são gerados os seguintes produtos: biogás, biometano, energia elétrica e energia térmica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). A tecnologia de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica é um exemplo, sendo uma alternativa utilizada em diversos municípios brasileiros, como por exemplo, em São Paulo, em que o Aterro Bandeirantes possui um potencial de geração de 170 MWh de energia elétrica, suficiente para abastecer 400 mil pessoas (SENAGA, 2004).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2014), no processo de escolha da estratégia e tecnologia viável, é necessário o conhecimento e análise da quantidade de RSU coletado e sua destinação final. Além disso, é necessária a constante melhoria dos processos e estudos de novas tecnologias e suas aplicações, garantindo o alto nível de confiança do projeto. No Brasil, uma das

metodologias mais utilizadas é o aproveitamento energético do biogás dos aterros sanitários. Na Figura 3 são apresentadas algumas tecnologias de reaproveitamento energético de resíduos e seus principais produtos.

Figura 3 - Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e seus respectivos produtos finais



Fonte: Drudi et al. (2010)

Conforme a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (2020), a escolha dos sistemas tecnológicos também depende da realidade local, seus diversos aspectos sociais, ambientais e econômicos, devendo priorizar sempre a hierarquia da gestão de resíduos.

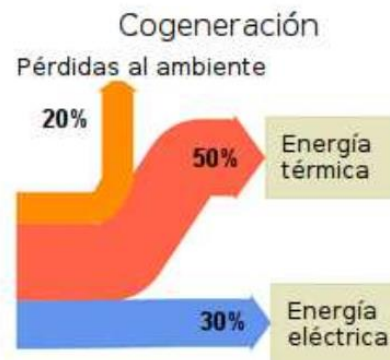
Oliveira (2004) menciona que o processo de aproveitamento energético apresenta algumas vantagens, tais como: a ampliação da segurança do sistema elétrico nacional, por ser uma opção considerada descentralizada, pois o resíduo fica disponível próximo dos centros consumidores, além da redução da quantidade de RSU a ser depositada em aterros sanitários, ampliando sua vida útil, e o possível aproveitamento de subprodutos, como por exemplo, o adubo e cinzas, utilizados assim em outros processos.

4.4 Waste-to-Energy

A tecnologia *Waste-to-Energy* (WTE) que, diferente de um sistema de incineração convencional, apresenta como característica principal a produção simultânea de energia, tanto térmica quanto elétrica, através da recuperação do calor presente nos gases produzidos. Esta tecnologia pode ser chamada de

“cogeração”, devido seu funcionamento, em que parte da energia residual é usada como energia térmica (geralmente por meio da geração de vapor para um processo industrial ou água aquecida para um processo industrial ou para aquecimento doméstico) e outra parte é convertida em energia elétrica (MORATORIO, ROCCO, CASTELLI, 2012). Na Figura 4 são apresentadas as proporções de conversão aproximadas que podem ser obtidas no sistema de cogeração WTE.

Figura 4 - Proporções de Cogeração de Energia produzida no sistema *Waste-to-Energy*

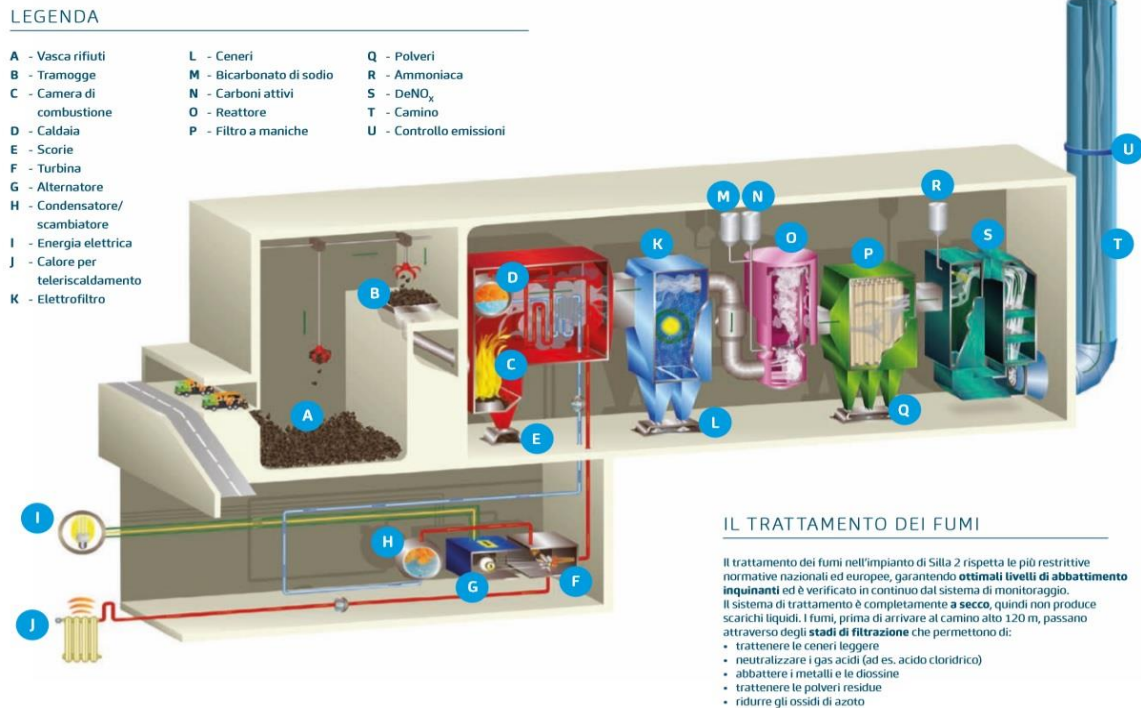


Fonte: Moratorio; Rocco; Castelli (2012)

Observa-se na Figura 4 que 50% da energia química pode ser convertida em energia térmica, 30% em energia elétrica e os 20% restantes são perdidos ao ambiente. Basicamente, o sistema apresenta as seguintes estruturas: setor de recebimento e pré-tratamento de resíduos, sistema de linhas de combustão e geração de vapor, turbina de ciclo térmico, sistema de tratamento das emissões atmosféricas, sistemas auxiliares mecânicos e eletro-instrumentais, chaminé de evacuação de fumaça, além do tratamento e remoção de cinzas (RANZINI, 2013).

Na Figura 5 é apresentado um esquema simplificado das etapas de incineração, tratamento de emissões atmosféricas e geração de energia pelo sistema WTE.

Figura 5 - Estrutura de uma usina WTE



Fonte: A2A Ambiente (2017)

Na Figura 5 são apresentadas as estruturas encontradas, produtos utilizados e derivados da usina *Silla 2*: silo de resíduos (A), guindaste de resíduos (B), câmara de combustão (C), caldeira (D), escória (E), turbina (F), alternador (G), condensador (H), energia elétrica gerada (I), calor para aquecimento urbano (J), eletrofiltro (K), cinzas (L), bicarbonato de sódio (M), carvão ativado (N), reator (O), filtro de mangas (P), poeira (Q), amônia (R), DeNO_x (S), chaminé (T), controle de emissões (U).

Conforme Kearns (2019), inicialmente é feita a separação do resíduo em componentes, incluindo operações pneumáticas, magnéticas e peneiramento. Assim, objetos grandes são removidos, além de separar a fração que ainda pode ser encaminhada para compostagem ou reciclagem. O resíduo é adequado para combustão, sem a necessidade de adicionar outro combustível quando contém menos de 50% de umidade, mais de 25% de carbono e tem apresenta menos de 60% de rendimento de cinzas. Plásticos, papel, papelão, couro, madeira e materiais alimentícios são todos componentes adequados para combustão.

O processo de combustão inicia-se no momento em que as substâncias contidas nos resíduos são expostas ao oxigênio e a alta temperatura, iniciando o processo da queima. Esta etapa ocorre no forno de incineração, formado pela câmara de combustão e a câmara de pós-combustão, onde ocorre a completa

queima das substâncias orgânicas voláteis contidas nos gases, para assim evitar a emissão de CO. Tais fornos apresentam diversas configurações, dentre elas a combustão em grelha, a mais empregada para RSU no estado bruto. O processo ocorre através de uma grade móvel inclinada de ação reversa, instalada em um forno-caldeira. Este permite o tratamento de resíduos com granulometrias variadas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2012).

A capacidade de geração não depende somente da eficiência de transformação em calor, mas também do poder calorífico do material utilizado como combustível. Caso este seja adequado o suficiente, a combustão é considerada autossustentável, ou seja, não existe a necessidade de adição de outros combustíveis.

No processo, são produzidas cinzas e escórias no forno de combustão, classificadas geralmente como classe II B - não perigoso e inerte, segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2004), podendo ser incluído na fabricação de agregados de cimento para construção civil. Também são produzidas cinzas volantes captadas pelos filtros de alta tecnologia, o qual são usualmente encaminhadas aos aterros para resíduos perigosos - classe I (BAIRD, 2011).

Um dos principais fatores que geram preocupações quanto às diversas tecnologias de incineração são as emissões atmosféricas, porém, em particular, as usinas WTE vêm apresentando diversas melhorias que garantem um melhor desempenho ambiental. Na Europa, o setor de usinas WTE segue o padrão BAT (*Best Available Technology*), documento de referência elaborado pelo painel europeu de especialistas, onde são definidas as melhores técnicas disponíveis para diversos setores industriais. Estão descritas práticas (incluindo procedimentos e tecnologias/equipamentos) mais eficazes ambientalmente, que evitam ou reduzem as emissões e o impacto no ambiente, e que possam ser aplicadas em condições técnica e economicamente viáveis. As conclusões BAT incluem referências às técnicas mais avançadas sobre emissões atmosféricas, combustão, desempenho, eficiência energética, eficiência de materiais, controle de ruído e a implementação de um sistema de gestão ambiental (CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS, 2019).

Em um estudo feito pela Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (TISI, 2019), é apresentada uma análise de custo e benefício por meio do

método MCA entre aterros e usinas WTE, em que são analisadas diversas situações que ocorrem em ambos os métodos. Estes são classificados de 0 a 5, onde 0 apresenta o menor custo benefício e 5 o maior, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Análise de custo benefício entre os aterros sanitários e as usinas WTE

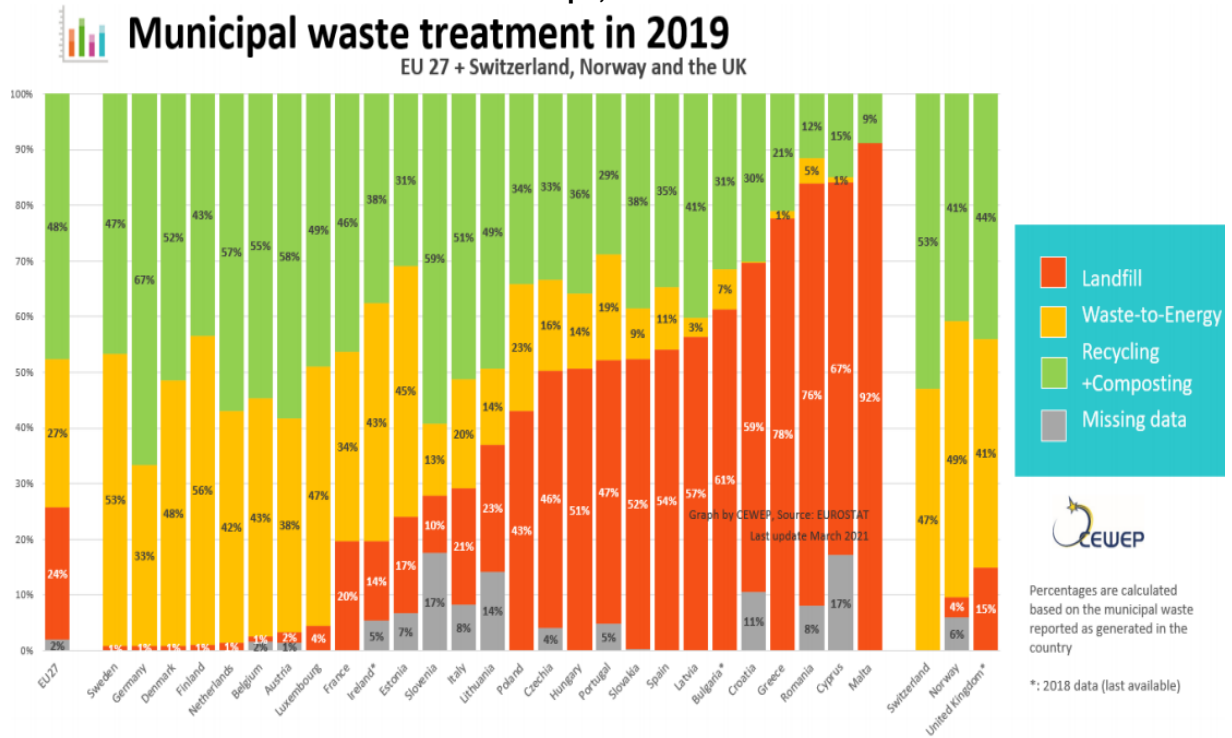
Critério	Aterro Sanitário	Usina WTE
Emissão de gases GEE	2	5
Contaminação da água e do solo nos aterros	1	5
Passivo ambiental nos aterros	0	5
Risco de explosão nos aterros	2	5
Produção de resíduos perigosos	5	1
Geração de emprego	2	5
Geração de energia (eficiência)	1	5
Benefício de arrecadação de impostos	1	5
<i>Tipping fee</i>	4	1
Score	18	37

Fonte: Tisi (2019)

A partir do cálculo do *score* entre os diversos critérios, é possível estimar que o custo benefício em questões ambientais é maior em usinas WTE. As principais vantagens desta tecnologia é a estabilização dos resíduos, redução de volume, desintoxicação do material (particularmente de agentes cancerígenos, materiais patologicamente contaminados e compostos orgânicos tóxicos), garante a não produção do lixiviado. Além disso, em tal sistema ocorre a recuperação de energia, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, sendo estes altamente poluidores (TISI, 2019).

Atualmente, em países como Áustria, Alemanha, Suécia, Bélgica, Dinamarca, Finlândia, Suíça, Itália, Reino Unido, Singapura, China, Japão, dentre outros, é realizado o reaproveitamento de quase todos os resíduos gerados, através de tecnologias de reciclagem, biodigestão da fração orgânica e recuperação energética nas usinas WTE. Esta realidade é demonstrada na Figura 6, em que a porcentagem demonstrada em vermelho é a quantidade de resíduo encaminhado para aterros sanitários, em amarelo para usinas *Waste-to-Energy* e em verde a quantidade encaminhada para reciclagem/ compostagem.

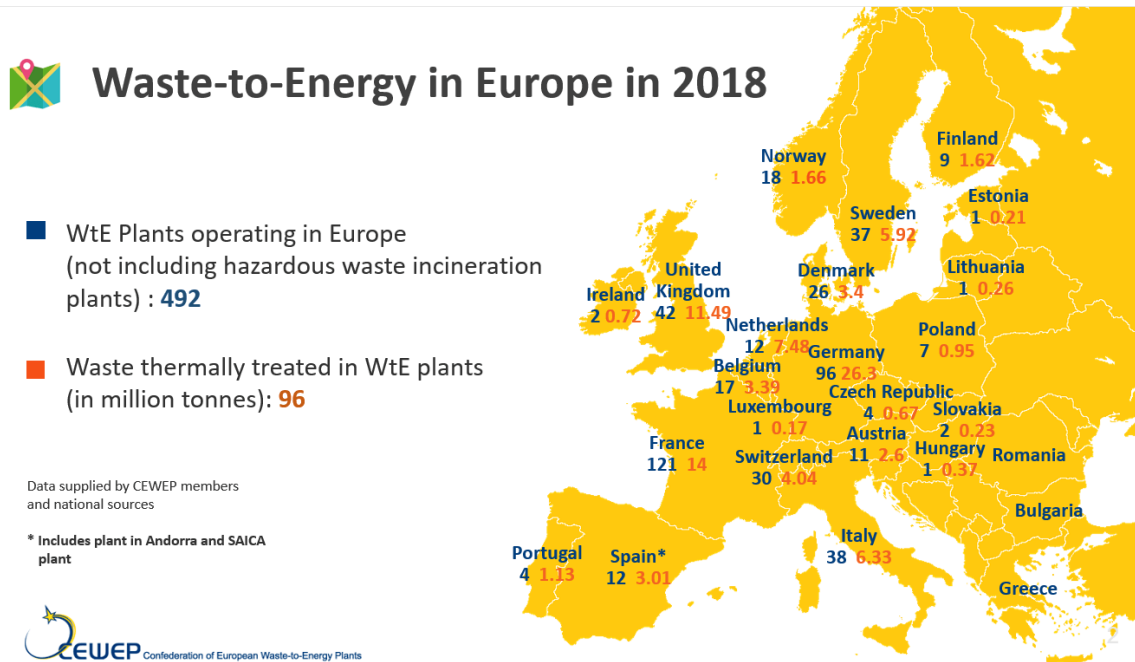
Figura 6 - Porcentual da destinação final dos resíduos sólidos urbanos em alguns países da Europa, em 2019



Fonte: Confederation of European Waste-to-Energy Plants – CEWEP, (2021)

Na Figura 7, é demonstrada a quantidade de usinas WTE em operação na Europa, não incluindo incineração de lixo perigoso (hospitalar, radioativo, etc.). Em azul é a quantidade de usinas e em vermelho a quantidade de resíduos tratados termicamente em milhões de toneladas.

Figura 7- Quantidade de usinas *Waste-to-Energy* na Europa, em 2018



Fonte: Confederation of European Waste-to-Energy Plants – CEWEP (2021)

4.4.1 Tratamento de Emissões Atmosféricas das Usinas *Waste-to-Energy*

Em relação às tecnologias que envolvem a incineração de resíduos, existem diversas discussões a respeito dos riscos das emissões atmosféricas e poluição ambiental. Primeiramente, é importante realizar uma comparação com a principal destinação final do Brasil, os aterros sanitários e lixões. De acordo com um estudo da Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos – ABREN (2020), tais metodologias amplamente implementadas no Brasil são responsáveis pela geração de Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial o gás metano (CH₄), com potencial 25 vezes maior de aquecimento global o gás carbônico (CO₂), responsável por 3% das emissões totais de GEE na atmosfera. De acordo com um estudo de Mavropoulos (2015), existe um grande risco de contaminação dos recursos hídricos pelo lixiviado, consequentemente diversos danos à saúde humana. No Brasil é gasto aproximadamente R\$ 1,5 bilhão por ano no tratamento de doenças de pessoas que tiveram contato inadequado com RSU, ou seja, R\$ 10 bilhões em 10 anos. Além disso, entre 2010 e 2014, foram gastos entre US\$ 1,4 bilhão e US\$ 2,8 bilhões devido a danos ambientais causados pelos RSU.

Os principais poluentes derivados das usinas WTE são: gás carbônico (CO₂), gases ácidos clorídrico (HCl), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), e

material particulado. Em menores concentrações, encontra-se o ácido fluorídrico (HF). Juntamente com a combustão incompleta, há a produção de monóxido de carbono (CO), dioxinas, e furanos. Associados ao material particulado, a emissão de metais pesados (CAIXETA, 2005).

Quanto ao controle de emissões atmosféricas, o Brasil conta com diversas legislações que estipulam padrões, como a Resolução CONAMA n.º 05/89, Resolução CONAMA n.º491/2018.

De acordo com a informações do documento de A2A Ambiente (2019), o sistema de tratamento de emissões atmosféricas utilizado na usina *Silla 2* segue e respeita todos os padrões nacionais e europeus, destacando-se principalmente no tratamento de ácido clorídrico, óxido de enxofre, NOx e material particulado.

O tratamento funciona da seguinte forma: primeiramente utiliza-se um precipitador eletrostático, e em sua jusante é instalado um sistema de tratamento a seco, o qual tem como objetivo a redução de micropoluentes (metais pesados, dioxinas e furanos) e dos compostos ácidos (HCl, HF e SO₂) presentes nas emissões. Além disso, é composto por um sistema de injeção de reagentes (bicarbonato de sódio e carvão ativo) e de um filtro de mangas. Contém um sistema catalítico DeNOx para redução de óxidos de nitrogênio. Cerca de 15% dos gases que saem do precipitador eletrostático são recirculados na câmara de combustão.

Para a emissão dos gases na atmosfera, na saída do sistema catalítico DeNOx, os gases são sugados por um ventilador e enviado para a chaminé, de 120 metros de altura, que contém três tubos separados para evacuação dos vapores. A planta está equipada com um sistema de monitoramento contínuo de emissões (EMS), em cada linha.

Deve considerar-se também que, as emissões de metano geradas pela decomposição anaeróbia dos resíduos nos lixões são mais prejudiciais que as emissões injetadas pelos WTEs, o que favorece a redução do aquecimento global. (BAIRD, 2011).

4.4.2 Legislação para Usinas Waste-to-Energy no Brasil

A legislação ambiental brasileira influencia diretamente no processo de atuação das incineradoras e em possíveis implementações de usinas WTE no país. Dentre essas questões está a regularização da fixação de limites máximos de

emissões atmosféricas, disposição final das cinzas, funcionamento de sistemas térmicos dentre outras questões.

Atualmente, os principais desafios para instalações de tais usinas no país são as questões de viabilização dos projetos, aplicação de taxas para o tratamento do RSU e não ocorrência de leilões ou outros mecanismos de contratação e precificação adequada da energia elétrica gerada por essas usinas. As taxas para o tratamento do RSU é uma possível solução para a atual inexistência de meios de financiamento que permitam a sustentabilidade dos projetos e segurança econômica aos contratos de parceria público-privada.

A partir de 2019, projetos de lei foram propostos com objetivo de trazer a possibilidade do município encarregar o saneamento para empresas privadas, mediante contratos de longo prazo, possibilitando a cobrança do serviço por meio de tarifa na conta de consumo conjunta ou espelhada em outros serviços públicos. Este problema também teve como solução a aprovação do novo marco legal do saneamento básico do Brasil, o qual traz a obrigatoriedade de licitação por meio das parcerias público-privadas e permite a cobrança da tarifa de tratamento dos resíduos urbanos diretamente na conta de consumo de água. Quanto aos leilões, em 2020 o Ministério de Minas e Energia anunciou a realização do primeiro leilão regulado para a contratação de energia elétrica proveniente de WTE para 2021 (TISI, 2020).

Atualmente no Brasil existem as seguintes leis e resoluções que influenciam nos meios de operação e controle dos processos produtivos, sendo elas:

- Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, no qual estabelece um direcionamento para a recuperação energética dos gases gerados por meio das unidades de disposição final de resíduos sólidos, incentivando o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, além de determinar o uso de tecnologias que visem à recuperação de energia dos resíduos sólidos urbanos;
- Lei nº 12.187/2009: Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), o qual institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências;
- Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, o qual dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, evidenciando a obrigatoriedade do sistema possuir

unidades de recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de gases e partículas, tratamento de efluentes líquidos, tratamento de cinzas e escórias;

- Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006, que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas;
- Resolução CONAMA nº 436, de 22 de dezembro de 2011, o qual estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedidos de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007, e aborda os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de turbinas a gás para geração de energia elétrica.
- Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, que estabelece os padrões de qualidade do ar.
- Portaria Interministerial nº 274/2019, que disciplina a recuperação energética dos resíduos, buscando nortear o artigo 9º, §1º, da Lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010).

Mesmo considerando o fato de que o WTE é uma grande alternativa de destinação final dos resíduos, deve-se considerar que a prioridade é a sua reciclagem e reutilização. Além disso, muitas vezes o resíduo não apresenta características suficientes para ser encaminhado diretamente à incineração. Em ambos os casos pode-se considerar um pré-tratamento como uma solução aplicável.

4.5 Tratamento Mecânico Biológico

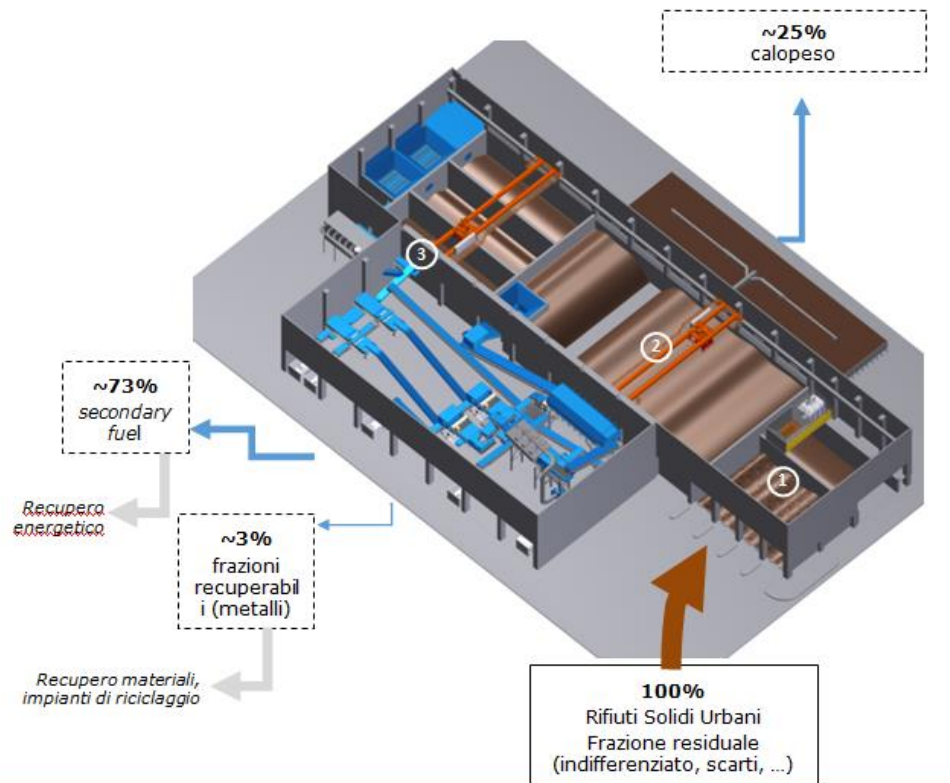
O Tratamento Mecânico Biológico (TMB) é a combinação de dois processos em série, voltados para o pré-tratamento do resíduo classificado como úmido, com o objetivo de remover algumas frações, tornando-o mais estável, além de separar a fração reciclável, permitindo o seu reaproveitamento. A primeira etapa é formada pelo sistema mecânico, constituída pela trituração e triagem, obtendo-se um material com possibilidade de ser reciclado (metais e inertes) e outro que é encaminhado para a etapa seguinte (DOTTI, 2007).

Ainda conforme Dotti (2007), posteriormente ocorre a etapa dos métodos biológicos, consistindo no processo de bio-estabilização, voltado para a estabilidade biológica, ou a biossecagem para a redução da umidade do resíduo. Este conjunto

tem como objetivo a separação dos rejeitos e dos resíduos orgânicos, realizando a energização antes da destinação final, a redução do volume da matéria e o aumento da composição de material com potencial energético. Este processo auxilia na redução do volume que posteriormente será encaminhado para um aterro sanitário ou incinerador.

Em diversos países europeus, como por exemplo, Suíça, França, Espanha e Itália, essa técnica é consolidada há aproximadamente 15 anos, sendo utilizada como pré-tratamento dos resíduos classificados como indiferenciados, ou seja, aqueles que não apresentam capacidade de reaproveitamento antes de serem encaminhados para a destinação final. As principais vantagens desta metodologia é a recuperação de materiais recicláveis que possivelmente iriam diretamente para a destinação final, a obtenção de um material com maior capacidade de aproveitamento energético devido à redução da matéria úmida e das frações com baixo potencial energético, além de garantir a estabilidade do resíduo, minimizando a produção de biogás e chorume, diminuindo o perigo de poluição caso for encaminhado para um aterro sanitário (GRECO, 2014). Na Figura 8 é apresentado um esquema simplificado dos modelos de tratamento mecânico biológico de biossecagem da empresa A2A Ambiente.

Figura 8 - Esquema Simplificado de um sistema de Tratamento Mecânico Biológico com Biossecagem



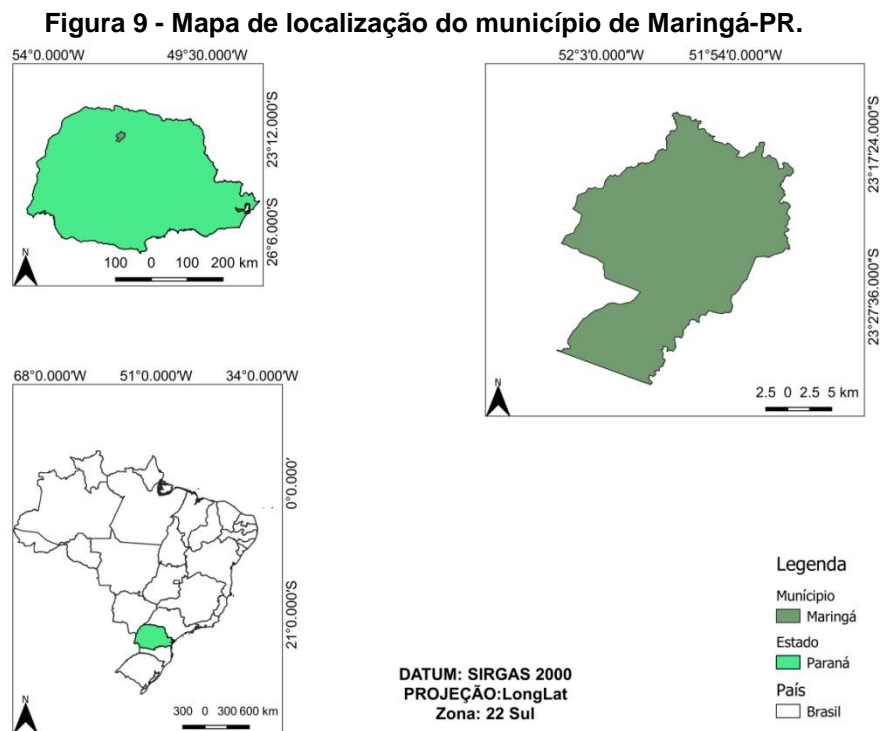
Fonte: A2A Ambiente (2016)

Como apresentado na Figura 8, através do resíduo que entra no processo, após o tratamento, são extraídas algumas frações, sendo elas, em geral, 73% transformado em combustível sólido secundário (CSS) encaminhado para o sistema WTE ou para fábricas de cimento ou centrais elétricas, 25% é referente à matéria orgânica degradada ao ambiente, além dos 3% de material reciclável encaminhado para os sistemas de reciclagem (A2A AMBIENTE, 2016).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de Estudo

A área de estudo do trabalho em questão abrange o município de Maringá que, conforme apresentado na Figura 9 está localizado no noroeste do estado do Paraná, situado a 555 metros de altitude, nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 23° 25' 38" Sul, Longitude: 51° 56' 15" Oeste, sendo cortada pelo Trópico de Capricórnio. Possui área territorial de 487,012 km² e uma população estimada em 430.157 mil pessoas, totalizando uma densidade demográfica de 733,14 hab/km², em 2020. Caracteriza-se por apresentar 83% dos domicílios com esgotamento sanitário adequado, 97,3% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 90,6% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020).



Fonte: Autoria Própria (2021)

Este estudo utiliza como referência também a gestão de resíduos do município de Milão, capital da região Lombardia, norte da Itália. O município é a capital da Província, principal divisão territorial do país, também com a mesma nomenclatura, que abrange 134 comunas, ou seja, a unidade básica de organização territorial. As coordenadas geográficas são: 45°27'51" Norte de Latitude e 9°11'25"

Leste de Longitude, sua área territorial é de 1.575,48 km². Apresenta uma população de 3.263.752 de habitantes (ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA, 2019).

5.2 Coleta e tratamento de dados

Esta pesquisa iniciou-se a partir de um estudo sobre o sistema de gestão de resíduos do município de Milão e também da Itália como um todo, por meio de pesquisa bibliográfica em documentos científicos, análise de documentos técnicos, visitas técnicas nos sistemas WTE dos municípios de Milão e Brescia, à central de triagem do plástico e acompanhamento da coleta seletiva na cidade de Milão, sendo estruturas administradas e executadas pela empresa A2A Ambiente. Outra etapa importante foi a realização de um *brainstorming* com especialistas do setor de projetos da empresa.

Após o estudo de Milão, foi iniciado um diagnóstico do Município de Maringá por meio de solicitações de informações via protocolo à Secretaria Municipal de Serviços Públicos (SEMUSP) de Maringá, a respeito da coleta seletiva, da coleta convencional, destinação final dos resíduos e dados gravimétricos dos resíduos gerados e coletados no município. Além disso, foram feitas entrevistas com a diretora de coleta seletiva e materiais recicláveis Aline Cristina Ramos Gava e o secretário municipal de serviços públicos Paulo Gustavo de Lima Ribas.

Foram disponibilizados dados quantitativos de resíduos encaminhados ao aterro sanitário do município referente aos anos de 2018 a 2020. A partir dos dados foi possível realizar os devidos cálculos e estimativas do poder calorífico inferior (PCI), da potência térmica e elétrica, considerando as tecnologias aplicadas pela empresa italiana A2A Ambiente, sendo assim adaptadas para a realidade do município de Maringá-PR.

Primeiramente, para a análise e dimensionamento do sistema WTE e posteriormente para os cálculos de geração de energia, foram obtidos valores médios do Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada resíduo, com base em dados encontrados na revisão de literatura. Para a definição dos valores do PCI, foram selecionados entre dois a quatro artigos científicos para cada resíduo da composição gravimétrica, e assim realizado um cálculo de valor médio. Para alguns, tais como os combustíveis derivados de resíduos (CDR) e os resíduos

farmacêuticos, foi encontrado apenas um artigo no qual apresentasse o valor do PCI.

A partir dos valores levantados, foi calculado o PCI proporcional para cada resíduo considerando a composição gravimétrica em percentual, e depois o seu valor total, por meio da multiplicação entre o PCI, em kcal/kg, e o valor referente ao resíduo em porcentagem.

As etapas deste estudo foram acompanhadas pelos profissionais da A2A Ambiente, empresa que atua em diversas cidades da Itália, com sua sede em Brescia, possuindo uma das suas unidades operacionais em Milão, na Itália, responsável pela coleta seletiva e convencional, gestão de sistemas de reciclagem (vidro, papel, plástico, compostagem, lodos dentre outros) e usinas de recuperação energética. A partir disso, juntamente com os profissionais especialistas da empresa mencionada, os dados obtidos foram analisados.

Considerando a elevada umidade do resíduo devido a quantidade de sua fração orgânica, tal fator influencia diretamente o PCI. Portanto foi necessária a realização de cálculos considerando a aplicação do pré-tratamento mecânico biológico, em que é reduzida a umidade do orgânico, aumentando assim o PCI total para posterior utilização no WTE.

Especificamente, foram realizados os cálculos para adoção da tecnologia da biossecagem, que consiste em um processo similar a compostagem, porém ao invés de produzir o composto orgânico, tem o objetivo de produzir um combustível derivado de resíduo (CDR). Este tratamento aumenta o poder calorífico do material final, além de favorecer sua combustão e aproveitamento energético. Tal processo consiste no controle de aeração, incorporação de materiais auxiliares (material estruturante) e revolvimento (LUCATTI et. al, 2017). Para etapa, foi considerado os dados do documento *Rapporto Rifiuti Urbani* (2019) emitido anualmente pelo *L'istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale* (ISPRA), e verificado a quantidade de resíduo restante após o pré-tratamento, em comparação com os dados de entrada. Foi utilizando como exemplo o sistema do município de Cedrasco, na Itália, em 2018. Através destes dados, foi realizada a comparação do PCI do resíduo com e sem pré-tratamento.

A partir disso, para concluir a análise de viabilidade técnica da usina, a partir dos dados obtidos referente à quantidade, característica e PCI, foi calculada a

quantidade de resíduos tratados por meio da equação 1 e com base no sistema de funcionamento de um WTE com fornos a grelha, como o *Silla 2*.

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = Q \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / F \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo:

Q_t : Quantidade de resíduos tratados, em toneladas por hora

Q : Quantidade de resíduos destinados ao WTE, em toneladas por ano

F : Tempo de funcionamento anual da usina WTE, em horas por ano

Posteriormente, foi calculada a potência térmica do sistema, por meio da equação 2:

$$P_t \text{ (MWt)} = Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times \text{PCI (kJ.kg}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo:

P_t : Potência térmica do sistema, em Megawatt térmico (MWt)

Q_t : Quantidade de resíduos tratados, em toneladas por hora

PCI: Poder calorífico inferior total dos resíduos, em kilojoules por kilograma

Conforme já apresentado na Figura 4, o rendimento de geração de energia elétrica sobre a energia térmica é de 30%. Portanto, a partir do valor encontrado na equação 2, deverá ser considerado apenas este percentual citado para a geração de eletricidade, ou seja, a potência elétrica do sistema (MWe).

Deverá ser considerado também que entre 4% e 5% da potência térmica é consumida para o funcionamento e pelos sistemas internos do WTE. Por meio da multiplicação da média destes valores percentuais com o valor da potência térmica (P_t), foi encontrada a quantidade de energia elétrica gerada e disponível para a rede de transmissão elétrica. Por fim, foi estimada a quantidade de residências maringenses que poderiam ser atendidas em função da energia elétrica a ser produzida.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

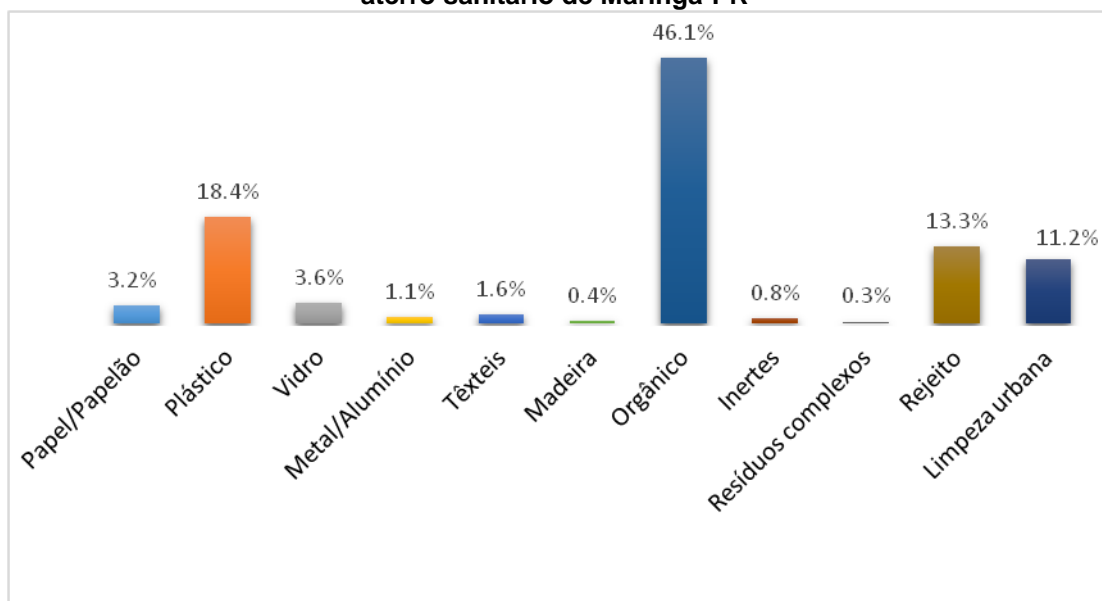
6.1 Panorama dos Resíduos Sólidos de Maringá-PR

Na coleta convencional no Município de Maringá-PR, obtêm-se diariamente uma média de 300 toneladas de resíduos, resultando em 7.800 toneladas por mês, aproximadamente. Este serviço ocorre de segunda-feira a sábado, três vezes por semana, pelo sistema porta a porta (SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE MARINGÁ, 2020).

A coleta seletiva em Maringá é disponibilizada para todo o município. Conforme Secretaria Municipal de Serviços Públicos de Maringá (2020), os resíduos recicláveis coletados na área urbana de Maringá-PR são de aproximadamente 30 toneladas por dia. Porém, de acordo com as informações apresentadas pelas cooperativas de reciclagem, que recebem os resíduos da coleta seletiva, após a triagem, cerca de 21,83% de todo o material que chega não pode ser reaproveitado e, portanto, classificados como rejeitos e encaminhados ao aterro sanitário.

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos residenciais do município que são coletados pelo serviço da SEMUSP, foi obtida por meio da metodologia do quarteamento e apresentada no Plano Municipal de Gestão Integrada De Resíduos Sólidos Urbanos - PMRSU, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares encaminhados ao aterro sanitário de Maringá-PR



Fonte: Prefeitura Municipal de Maringá (2017)

Tal composição gravimétrica apresentada na Figura 10 se refere a todo o resíduo da coleta convencional encaminhado ao aterro sanitário e, portanto, desconsidera o referente à coleta seletiva. Conforme os dados repassados pela SEMUSP (2020), a quantidade de resíduo coletado pela coleta seletiva é de aproximadamente 9% a 10% em relação ao total da coleta convencional. Todo o resíduo recolhido pela coleta convencional, atualmente não passa por pré-tratamento antes de ser encaminhado a disposição final.

Na Tabela 1 são apresentados dados referentes aos resíduos coletados pela coleta convencional de Maringá-PR, estes que atualmente são destinados à disposição final no Aterro Sanitário.

Tabela 1 - Quantidade de resíduos coletados pela coleta convencional em Maringá-PR

Composição Gravimétrica	Média	2018 (t/ano)	2019 (t/ano)	2020 (t/ano)
Papel/Papelão	3,2%	3.679,2	3.504,0	3.532,2
Plástico	18,4%	21.155,4	20.148,0	20.310,1
Vidro	3,6%	4.139,1	3.942,0	3.973,7
Metal/Alumínio	1,1%	1.264,7	1.204,5	1.214,2
Têxteis	1,6%	1.839,6	1.752,0	1.766,1
Madeira	0,4%	459,9	438,0	441,5
Orgânico	46,1%	53.003,5	50.479,5	50.885,7
Inertes	0,8%	919,8	876,0	883,0
Resíduos complexos	0,3%	344,9	328,5	331,1
Rejeito	13,3%	15.291,7	14.563,5	14.680,7
Limpeza urbana	11,2%	12.877,2	12.264,0	12.362,7
Total	100%	114.975,0	109.500,0	110.381,1

Fonte: Autoria Própria (2021)

Vale ressaltar que a mesma composição gravimétrica foi aplicada para ambos os anos, pois é utilizada como base pela Prefeitura, como apresentado no PMRSU.

As quantidades de resíduos coletados na coleta seletiva em 2019 e 2020 foram de 6900,14 toneladas e 6324,98 toneladas, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 2. Considerando que aproximadamente 22% do resíduo encaminhado às cooperativas de reciclagem se tornam rejeitos, foi calculada a quantidade em toneladas deste material, em relação ao ano de 2020, sendo estes também encaminhados ao aterro sanitário. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de resíduos e rejeitos gerados nas cooperativas de reciclagem

Ano	Resíduo Encaminhado p/ Cooperativas de Reciclagem	Rejeito da triagem (%)	Total efetivamente reciclado	Rejeito da triagem (t)
2019	6.900,14	22%	5.393,84	1.506,30
2020	6.324,98	22%	4.944,24	1.380,74

Fonte: Autoria Própria (2020)

De acordo com as informações cedidas pelos responsáveis da SEMUSP, os materiais predominantes que chegam às cooperativas são o plástico e o papelão. A partir dos dados das Tabelas 1 e 2, percebeu-se que não houve alterações consideráveis entre os anos e, decidiu-se que para as próximas etapas do estudo foi considerado o valor do ano mais recente, ou seja, 2020.

6.1.2 Waste-to-Energy em Maringá-PR

Na etapa de pesquisa e coleta de informações, foi realizada uma entrevista com o ex-prefeito e engenheiro civil, Silvio Magalhães Barros II. Durante a sua gestão, entre 2005 e 2013, propriamente em 2012, foi proposto um projeto para a instalação da primeira usina WTE do Brasil, em Maringá-PR. A proposta do projeto surgiu após conhecer informações da tecnologia que estava em operação na cidade de Kakogawa, no Japão em 2005 e após visitas em alguns países da Europa que também utilizavam WTE. Sendo assim, a ideia foi propor uma tecnologia de tratamento de resíduos sólidos com cogeração de energia elétrica. Além disso, o projeto apresentava uma solução que tratasse os resíduos adequadamente e solucionasse um problema comum em diversos municípios brasileiros, relacionado à complexidade na seleção, na instalação e o licenciamento ambiental de aterros sanitários.

Na época da discussão em relação à implantação do projeto de WTE, uma empresa privada apresentou uma proposta de manifestação de interesse (PMI), e verificou-se que o projeto seria viável do ponto de vista econômico e o custo para o município com a destinação dos resíduos se manteria o mesmo em relação ao que já era investido no aterro sanitário. O lucro da empresa seria proveniente principalmente da geração de energia elétrica, e além de Maringá, outros municípios

vizinhos também destinariam seus resíduos sólidos urbanos à empresa, assim como algumas indústrias, por exemplo, do ramo têxtil.

O projeto, porém, não foi levado adiante devido a desacordos políticos, falta de apoio dos governos federal e estadual, além de forte resistência de grande parcela da população maringaense. Outro ponto levantado durante as discussões foi que o projeto divergia em relação a uma das ações prioritárias contida na PNRS, que se refere ao incentivo e apoio por parte dos municípios na estruturação da coleta seletiva e apoio as associações e cooperativas de reciclagem.

Porém, destaca-se que conforme apresentado no presente trabalho, a coleta seletiva é um pilar fundamental para a gestão dos RSU e também para o funcionamento das usinas WTE, além de constar na PNRS a importância da recuperação energética dos resíduos. No mesmo ano de 2012, a Câmara de Vereadores de Maringá propôs um projeto de lei que proibia a incineração dos resíduos sólidos e recicláveis provenientes dos serviços de coleta pública e domiciliar do município, a qual, porém, não foi sancionada posteriormente pelo Poder Executivo.

6.2 Resíduos destinados ao aterro sanitário de Maringá-PR

Atualmente, resíduos oriundos da coleta convencional, da limpeza pública e varrição, os rejeitos da triagem das cooperativas de reciclagem, além de alguns resíduos volumosos e da construção civil, despejados irregularmente em vias públicas, são dispostos no aterro sanitário, serviço esse contratado por meio de licitação pelo município. A partir das informações fornecidas pela SEMUSP demonstradas anteriormente, foram definidas as características e a quantidade de resíduos encaminhados para o aterro sanitário municipal.

Foi informado que, em 2020, foram coletadas 2.901,11 toneladas de resíduos originados do serviço de varrição e roçada feito pelo serviço de limpeza urbana da prefeitura, sendo este um resíduo formado predominantemente por folhagem e, portanto, um resíduo parcialmente úmido. Quanto aos resíduos volumosos e os provenientes da construção civil descartados de maneira irregular no município, atualmente são encaminhados uma média de 12 toneladas por dia.

As quantidades de resíduos encaminhados ao aterro sanitário do município de Maringá no ano de 2020, conforme o tipo de coleta é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação e quantidade de resíduos encaminhados ao aterro sanitário de Maringá - PR em 2020

Resíduos conforme coleta	Quantidade em 2020 (t/ano)	Fração
Coleta Convencional	110.381,10	92%
Rejeito das Cooperativas de Reciclagem	1.380,74	2%
Resíduos Volumosos + RCCs	3.744,00	3%
Varição Urbana	2.901,11	3%
Total		100%

Fonte: Autoria Própria (2021)

Esta etapa de estudo da composição gravimétrica dos resíduos é de extrema importância tanto para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI), quanto para o estudo da eficiência do processo de combustão, juntamente com relação às estruturas do tratamento de emissões atmosféricas e conseqüentemente as análises para o investimento econômico.

6.3 Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos

Inicialmente no estudo do potencial energético dos resíduos, foi necessário estimar o PCI para os resíduos gerados em Maringá. Este cálculo é uma etapa fundamental para os sistemas de tratamento térmico, incluindo os incineradores e os sistemas que produzem combustível derivado de resíduos sólidos, pois determina a capacidade de descarte do sistema.

Foram encontrados na revisão de literatura alguns valores de PCI para cada tipo de resíduo sólido urbano coletado do município de Maringá (Apêndice A). Tal diferença de valores apresentada pelos diversos estudos ocorre principalmente devido a composição heterogênea de cada tipo de material. Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios obtidos.

Tabela 4 – Estimativa dos valores médios dos PCI dos resíduos

Resíduo	PCI (kcal/kg)
Papel/papelão	2.686,46
Madeira	2.814,06
Plástico	7.050,46
Orgânico	795,34
Têxtil	3.550,03
Resíduos de Limpeza Urbana	1.629,76
Ferro	0
Vidro	0
Inerte	0
Borracha	6.709,25
Outros	1.630,03
Resíduos Inferiores	1.110,52
Lodo de tratamento	1.171,88
Rejeitos da reciclagem	4.244,92
Medicamentos/RSS	3.113,07
Combustíveis derivados de resíduos (CDR)	3.582,00

Fonte: Aatoria Própria (2020)

Vale ressaltar que os resíduos classificados como CDR são os combustíveis derivados de resíduos que, de acordo com Fundação Estadual do Meio Ambiente (2012), são materiais derivados de uma série de etapas de classificação e remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos dos resíduos sólidos urbanos. Como resultado, obtém-se uma fração combustível de maior poder calorífico, formada por materiais como plásticos, papéis e papelão não reciclados, madeira, pano e fração orgânica. Já os resíduos inferiores referem-se àqueles derivados do tratamento mecânico biológico que não podem ser reaproveitados, devendo ser encaminhados ao aterro sanitário.

Em relação aos valores de PCI apresentados na Tabela 4, os resíduos orgânicos e os resíduos de limpeza urbana apresentam baixos valores, 795,34 e 1.629,76 kcal/kg, respectivamente, e juntos representam mais de 50% da composição gravimétrica dos resíduos gerados no município de Maringá-PR. Este fator conseqüentemente influencia diretamente no sistema de aproveitamento energético dos resíduos que estão sendo encaminhados ao aterro sanitário. De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM (2012), os resíduos

com alta umidade apresentam baixo poder calorífico em relação às demais frações, e como consequência resulta em uma carga térmica inferior à de projeto do forno de incineração, ocasionando a perda de potência nas unidades de geração de energia térmica. Para tais situações, metodologias alternativas ou um maior consumo de combustível auxiliar deverão ser empregados para o funcionamento do processo.

Conforme Empresa de Pesquisa Energética (2008):

“Para PCI < 1.675 kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável (além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar); Para 1.675 kcal/kg < PCI < 2.000 kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico; Para PCI > 2.000 kcal/kg, a queima bruta *mass burning* é tecnicamente viável.”

A partir dos valores apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, foi possível estimar o valor médio do PCI do resíduo sólido encaminhado para o aterro de Maringá para o ano de 2020 (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores do poder calorífico inferior (PCI) do resíduo encaminhado ao aterro sanitário de Maringá-PR de 2020

Origem dos resíduos	Fração	Quantidade de resíduos (t)	PCI (kcal/kg)	PCI Proporcional (kcal/kg)
Coleta Convencional	96%	110.381,11	2.106	2.027,69
Rejeito das Cooperativas de Reciclagem	1%	1.380,74	4.245	51,12
Varição Urbana	3%	2.901,11	1.213	30,68
Total	100%	114.662,96		2.109,49

Fonte: Autoria Própria (2021)

Na Tabela 5 não foi apresentada a fração de resíduos volumosos e da construção civil (RCC). Isto porque os RCCs são classificados majoritariamente como inertes e, portanto, não possuem propriedades que viabilizem sua utilização em processos de combustão. Além disso, embora alguns resíduos volumosos possam ser incinerados ou até mesmo reciclados, estes representam uma fração relativamente pequena, tornando-se inviável a implantação do processo de triagem específico, em um primeiro momento.

O PCI dos rejeitos das cooperativas de reciclagem foi determinado como rejeitos da reciclagem conforme apresentado na Tabela 4, pois embora seja

composto principalmente de papel e plástico, possui características de material misturado principalmente por restos alimentos. O PCI da varrição urbana foi obtido a partir da média entre o resíduo orgânico e da limpeza urbana. Esta média foi adotada, pois, foi considerada a característica do município que é altamente arborizado, tal fator afeta a taxa de umidade do resíduo considerando sua característica orgânica. Para a determinação do valor referente à coleta convencional foi calculado o PCI proporcional conforme a sua composição gravimétrica, apresentado na Tabela 1.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de PCI dos RSU da coleta convencional de Maringá considerando a composição gravimétrica do ano de 2020. Tal etapa foi novamente realizada para a determinação do PCI da coleta convencional, após o pré-tratamento.

Tabela 6 - Poder calorífico inferior (PCI) do resíduo da coleta convencional de Maringá-PR de 2020

Composição gravimétrica	Fração	Quantidade de resíduos (t)	PCI (kcal/kg)	PCI Proporcional (kcal/kg)
Papel/Papelão	3%	3.532,20	2.686	85,97
Plástico	18%	20.310,12	7.050	1.297,28
Vidro	4%	3.973,72	0	0,00
Metal/Alumínio	1%	1.214,19	0	0,00
Têxteis	2%	1.766,10	3.550	54,48
Madeira	0%	441,52	2.814	11,26
Orgânico	46%	50.885,69	795	366,65
Inertes	1%	883,05	0	0,00
Resíduos complexos	0%	331,14	1.630	4,89
Rejeito	13%	14.680,69	1.111	147,70
Limpeza urbana	11%	12.362,68	1.213	135,81
Total	100%	110.381,11		2.106,00

Fonte: Autoria Própria (2021)

De acordo com Kearns (2019), em países de baixa renda, a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos tende a predominar, em proporção, maior quantidade de alimentos e resíduos verdes, enquanto os países de renda mais alta tendem a ter mais recicláveis (vidro, metais, papel e papelão) e principalmente plástico. A Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (2020) exemplifica que, a umidade no RSU brasileiro (entre 45 e 55%) reduz o poder calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) a cerca de 7.500 a 8.500 kJ/kg, similar ao poder calorífico da biomassa residual derivado do bagaço de cana. Em

comparação, o RSU da China possui um PCI médio de 6.000 kJ/kg, enquanto na Inglaterra um PCI aproximado de 10.000 kJ/kg.

Embora o poder calorífico inferior do resíduo de Maringá atenda o valor mínimo para a viabilidade dos processos térmicos de 2.000 kcal/kg, conforme apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética (2008), este teria a possibilidade de ser elevado caso fosse adotada uma etapa de pré-tratamento na qual a carga orgânica (e conseqüentemente úmida) fosse reduzida.

Com base nos dados disponíveis e relatos de experiências dos profissionais da A2A Ambiente (2020), para o aumento do PCI do resíduo maringaense, o pré-tratamento mecânico biológico pode ser uma alternativa.

6.4 Tratamento Mecânico Biológico

Com o objetivo de diminuir a carga orgânica e a umidade do resíduo, foi estimado o resultado do tratamento mecânico-biológico antes de um possível encaminhamento à uma usina WTE.

Considerando o referencial teórico, foram utilizados os seguintes valores: a diferença entre o percentual de resíduo na entrada e a quantidade na saída, ou seja, a quantidade reduzida foi de 27,4%. Este valor é formado por duas frações, sendo 2,99% de resíduo com potencial de reaproveitamento na reciclagem e 24,43% de matéria orgânica degradada ao meio ambiente (compostos orgânicos voláteis).

Considerando que a parte relacionada à matéria orgânica degradada é subtraída do resíduo orgânico e a quantidade recuperável é retirada do rejeito e dos metais (devido à etapa específica de separação de materiais metálicos dentro do processo), verificou-se a diferença da quantidade de resíduo antes e após a biossecagem. Os valores obtidos estão apresentados nas Tabelas 7 e 8, e para esta etapa considerou-se apenas o resíduo da coleta convencional, devido às características ideais para o processo.

Tabela 7 – Composição e média anual da quantidade de resíduos na entrada do pré-tratamento

Resíduos	Fração	Quantidade de resíduo (t)
Papel/Papelão	3,2%	3.532,20
Plástico	18,4%	20.310,10
Vidro	3,6%	3.973,72
Metal/Alumínio	1,1%	1.214,19
Têxteis	1,6%	1.766,10
Madeira	0,4%	441,52
Orgânico	46,1%	50.885,69
Inertes	0,8%	883,05
Resíduos complexos	0,3%	331,14
Rejeito	13,3%	14.680,69
Limpeza urbana	11,2%	12.362,68
Total:	100%	110.381,11

Fonte: Aatoria Própria (2021)

Tabela 8 – Composição e média anual da quantidade de resíduos após o pré-tratamento

Resíduos	Fração	Quantidade de resíduo (t)
Papel/Papelão	4%	3.532,20
Plástico	25%	20.310,12
Vidro	5%	3.973,72
Metal/Alumínio	0%	0,00
Têxteis	2%	1.766,10
Madeira	1%	441,52
Orgânico	30%	23.922,61
Inertes	1%	883,05
Resíduos complexos	0%	331,14
Rejeito	16%	12.591,81
Limpeza urbana	15%	12.362,68
Total:	100%	80.114,96

Fonte: Aatoria Própria (2021)

Na Tabela 8, nota-se que foram subtraídas 1.214,19 toneladas de metais e 2088,88 toneladas de rejeitos, sendo estes pertencentes a 2,99% da fração com potencial de reaproveitamento, e 26.963,08 toneladas de resíduo orgânico, pois corresponde a 24,43% da matéria degradada no processo.

A partir de tais quantidades encontradas, e com a diminuição da fração úmida, pode-se então calcular o valor do PCI após o pré-tratamento, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Estimativa do poder calorífico inferior (PCI) do resíduo de Maringá-PR após a biossecagem

Origem dos resíduos	Fração	Quantidade de resíduos (t)	PCI (kcal/kg)	PCI Proporcional (kcal/kg)
Coleta Convencional	95%	80.114,96	2.605,47	2.473,28
Rejeito das Cooperativas de Reciclagem	2%	1.380,74	4.245,00	69,45
Varrição Urbana	3%	2.901,11	1.213,00	41,68
Total	100%	84.396,81		2.584,41

Fonte: Autoria Própria (2021)

Percebe-se que após a redução da quantidade de resíduo total com e sem o pré-tratamento, o PCI aumentou 22,5% comparando ao processo sem pré-tratamento. Isto porque, proporcionalmente diminuiu-se a quantidade de resíduo úmido, principalmente a matéria orgânica, a qual possuía maior influência no poder calorífico do resíduo. Com o aumento da segregação, aumentaram-se as frações com PCI mais elevado. Esta variação ocorre principalmente pela grande umidade da matéria orgânica, que prejudica o processo de obtenção de energia, além de representar uma quantidade superior aos demais resíduos.

Deve considerar-se também que o papel e o plástico são os componentes de maior influência positiva para a geração de energia e a separação dos demais componentes não gerou grande variação no processo, resultado que também pode ser atribuído ao fato de que são encontrados em pequenas quantidades. Embora o plástico apresente um alto PCI de 7.050,46 kcal/kg, contribuindo para combustão, é necessário salientar que, conforme Machado (2015) durante a sua queima ocorre uma alta produção de cinzas, o que pode gerar dificuldades no tratamento térmico destes combustíveis.

A partir dos novos valores estimados, percebem-se valores adequados para serem encaminhados à uma usina WTE, que como por exemplo a *Silla 2*, conforme A2A Ambiente (2019), para seu funcionamento, é autorizado a receber o resíduo com PCI entre 8.000 kJ/kg a 14.000 kJ/kg, ou seja, entre 1.912 kcal/kg a 3.346 kcal/kJ. Portanto, pode considerar-se que o estudo foi aplicado a um sistema ideal, tendo como avaliação final positiva para o resultado.

Deve-se resaltar que os valores de PCI de resíduos não são fixos, podendo alterar de acordo com as variações das características químicas e físicas do resíduo. Esta variação ocorre devido a sazonalidade e local de origem, está relacionado também com níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico, sanitário, cultural e com as práticas de reciclagem, incineração e hábitos de desperdícios da sociedade (CARNEIRO,2015).

Portanto, conforme apresentados pelos profissionais da A2A Ambiente, durante o funcionamento de uma usina WTE é imprescindível conhecer detalhadamente as características dos resíduos encaminhados, para que haja um ajuste correto dos parâmetros da operação da usina e avaliação de seu desempenho energético e ambiental. Esta etapa ocorre por meio de análises contínuas dos resíduos que são destinados à usina, e que deve ser realizado pela equipe operacional, permitindo de fato que haja condições ideais para o processo de combustão e atendimento dos padrões de emissões atmosféricas.

6.5 Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica

Após a estimativa em relação às características dos resíduos gerados em Maringá e destinados ao aterro, e posteriormente o respectivo PCI médio, foi possível calcular a potência térmica, com base nas equações 1 e 2 descritas na metodologia deste estudo.

Primeiramente foi realizado o cálculo da potência térmica da usina nos cenários sem pré-tratamento e com o pré-tratamento, separados, para a definição do porte da usina.

Considerando a disponibilidade de resíduos de 114.662,96 (t.ano⁻¹) e um PCI de 2.109,49 kcal/kg (aproximadamente 8.800 kJ/kg), levou-se em consideração que o funcionamento anual da usina será de 8.000 horas, valor utilizado como base a média de funcionamento anual da usina *Silla 2* (A2A AMBIENTE, 2019), verificou-se que:

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = Q \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / F \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = 114.662,96 \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / 8.000 \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} = 14,33 \text{ t.h}^{-1}$$

Considerando a possibilidade de incinerar 14,33 toneladas por hora, a potência térmica atingida em Megawatt térmico (MWt) com os resíduos sem pré-tratamento será de:

$$Pt \text{ (MWt)} = Qt \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times PCI \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Pt \text{ (MWt)} = 14,33 \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times 8.800 \text{ (kJ/kg)} \times (1 \text{ h}/3.600 \text{ s}) \times (1000 \text{ kg/t}) = 35 \text{ MWt}$$

Para os cálculos de Potência foi considerado o fator de conversão de unidades, em que: 1 MWt equivale a 1000 kJ/s.

Posteriormente, foram calculadas a quantidade e a potência considerando a implantação do pré-tratamento:

$$Qt \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = Q \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / F \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Qt \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = 84.396,81 \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / 8.000 \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} = 10,5 \text{ t.h}^{-1}$$

Considerando a possibilidade de incinerar 10,5 toneladas por hora, a potência térmica atingida em Megawatt térmico (MWt) com os resíduos com pré-tratamento será de:

$$Pt \text{ (MWt)} = Qt \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times PCI \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Pt \text{ (MWt)} = 10,5 \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times 10.800 \text{ (kJ/kg)} \times (1 \text{ h} / 3.600 \text{ s}) \times (1000 \text{ kg/t}) = 31,5 \text{ MWt}$$

Conforme informações obtidas junto aos profissionais da A2A Ambiente, considerando os valores da potência térmica da usina com os resíduos de Maringá, verificou-se que a usina do município deve possuir uma estrutura com a capacidade de atuar com uma Potência entre 30 e 35 MWt, para que atinja a sua eficiência de produção, em compensação com os custos e capacidade de recebimento. Tal análise é de extrema importância no momento de calcular o investimento necessário para a escolha do porte da usina, com objetivo de atender a real demanda do município.

A partir desta etapa, foi possível estimar a quantidade de energia elétrica produzida. Considerando a realidade brasileira, onde as residências não possuem a necessidade de energia térmica nas residências para o aquecimento nos períodos inverniais, como na Europa, por exemplo, foi calculada apenas a geração de energia

elétrica. Existe ainda a possibilidade de considerar a energia térmica produzida e que pudesse ser cedida a produção industrial, porém tal estudo poderá ser realizado em trabalhos futuros.

Considerando a Figura 4, que apresenta que o rendimento para a energia elétrica é de aproximadamente 30%, para o cálculo da potência elétrica do gerador foi considerada a Equação 3:

$$Pe \text{ (MWe)} = Pt \text{ (MWt)} \times 30\% \quad \text{Eq. (3)}$$

No cálculo, foi considerada também a quantidade do consumo elétrico utilizado para o funcionamento da própria usina, uma média entre 4% e 5% da potência elétrica da usina. Na Tabela 10 estão apresentados os dados de Potência obtidos no estudo em função da implantação ou não da etapa de pré-tratamento.

Tabela 10 – Potência elétrica disponibilizada através dos resíduos de Maringá-PR

Potências	Sem Pré-Tratamento	Com Pré-Tratamento
Potência térmica (MWt)	35,00	31,50
Potência elétrica (MWe)	10,50	9,45
Potência elétrica concedida à rede (MWe)	8,93	8,03

Fonte: Autoria Própria (2021)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 10, percebe-se que mesmo com 27,4% a menos de resíduos, houve um aumento de 22,5% no poder calorífico inferior, permitindo que a diferença entre a produção de energia elétrica fosse de apenas 0,89 MWe. Desta forma, optou-se para o cálculo de atendimento das residências de Maringá pelo valor do resíduo com pré-tratamento.

Considerando que mensalmente a usina funcione durante 720 horas (considerando 30 dias e 24 horas), na Equação 4 é apresentado a potência elétrica (Pe) mensal e disponibilizada na rede:

$$Pe \text{ mensal (kWe/mês)} = Pe \text{ (kWe)} \times \text{tempo de funcionamento da usina (h)} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$Pe \text{ mensal (kWe/mês)} = 8.030 \text{ (kWe)} \times 720 \text{ (h)} = 5.781.600 \text{ kWh/mês}$$

Considerando que a demanda energética de cada residência maringaense é de 163 kWh/mês por unidade consumidora, conforme relatado por Paraná Cooperativo (2020), a usina teria a capacidade de produzir energia elétrica para aproximadamente 35.470 residências maringaenses. Esta quantidade é um valor estimado e, portanto, para valores exatos, outros aspectos devem ser estudados como, por exemplo, a utilização por cada habitante, consumo nos horários de pico, capacidade e estruturas da rede de distribuição, etc. Outro ponto que deve ser levado em consideração é que a demanda energética utilizada é da região sul, e que, portanto apresenta características e demandas diferentes de outros locais do Brasil. Portanto é necessária uma avaliação minuciosa dos diversos critérios e demandas do município a ser adotada a tecnologia.

Neste caso foi considerada apenas a geração de energia elétrica. Portanto, o vapor gerado no ciclo termodinâmico é expandido na turbina, e, ao sair, é condensado. Quando ocorre a geração simultânea de vapor e energia elétrica, conhecido como cogeração, o rendimento energético pode atingir 60% a 80%. O custo benefício se torna maior na medida em que mais eletricidade poderia ser gerada, aproveitando-se a estrutura construída para incineração dos resíduos (CARNEIRO, 2015).

Conforme apontado pela Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos – ABREN (2019), neste contexto de geração de energia elétrica, as usinas WTE possuem como vantagem uma baixa intermitência comparado a fontes como a eólica e solar, com fator de capacidade acima de 90%. Isto porque é uma fonte termoelétrica que realiza geração contínua e ininterrupta, exceto em paradas para manutenção que ocorrem esporadicamente e de forma planejada. Tal fator contribui para a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico. Além disso, uma usina WTE gera energia a preços competitivos equiparados às termoelétricas convencionais movidas a combustível fóssil (diesel ou óleo cru), muito utilizado ainda no Brasil.

De acordo com Goldemberg e Ribeiro (2005), é necessário expandir o suprimento de energia no Brasil para aumentar o seu Produto Nacional Bruto (PN) per capita. Além disso, o setor energético possui grandes perspectivas de criação de empregos. Os autores trazem também que é de suma importância que a energia seja originada de diversas fontes energéticas, devido razões de segurança de abastecimento.

Deste modo, vale ressaltar os diversos benefícios ambientais atrelados com os fatores apresentados neste estudo. Em um estudo realizado por Soares, Miyamaru e Martins (2017), metodologias de tratamento de RSU que utilizam o pré-tratamento mecânico biológico são menos impactantes considerando o potencial de impacto no aquecimento global e na acidificação. Isto porque, com a segregação de resíduos orgânicos e que conseqüentemente não são aterrados, causam menor impacto ambiental em comparação às demais tecnologias de aterro, diminuindo as emissões de gases poluentes. É apresentado também que o efeito potencial de depleção de ozônio, no envio ao aterro sanitário, é mais agressivo no longo prazo. Soares, Miyamaru e Martins (2017) afirmam que a geração de energia elétrica através do processo combinado de tratamento mecânico biológico e incineração é mais atraente comparado ao aterro sanitário, tanto em termos de impactos ambientais quanto em termos econômicos. Isto devido às novas tecnologias de incineração, que proporcionam alta confiabilidade na remoção de gases tóxicos, atendendo as mais rigorosas leis ambientais no mundo e no Brasil.

Conforme Tisi (2019), a tecnologia WTE evita que resíduos sejam encaminhados aos lixões, por exemplo, e conseqüentemente combatendo a proliferação de vetores e doenças, a contaminação do solo, dos recursos hídricos e emissões atmosféricas sem tratamento.

6.6 Melhorias no sistema de gestão de resíduos de Maringá-PR

Diante dos resultados, percebe-se o potencial que o resíduo maringaense possui, em relação ao seu aproveitamento e tratamento. Neste sentido, foi possível observar diversas ações no município de Milão, Itália, os quais podem servir como referência para a realidade maringaense.

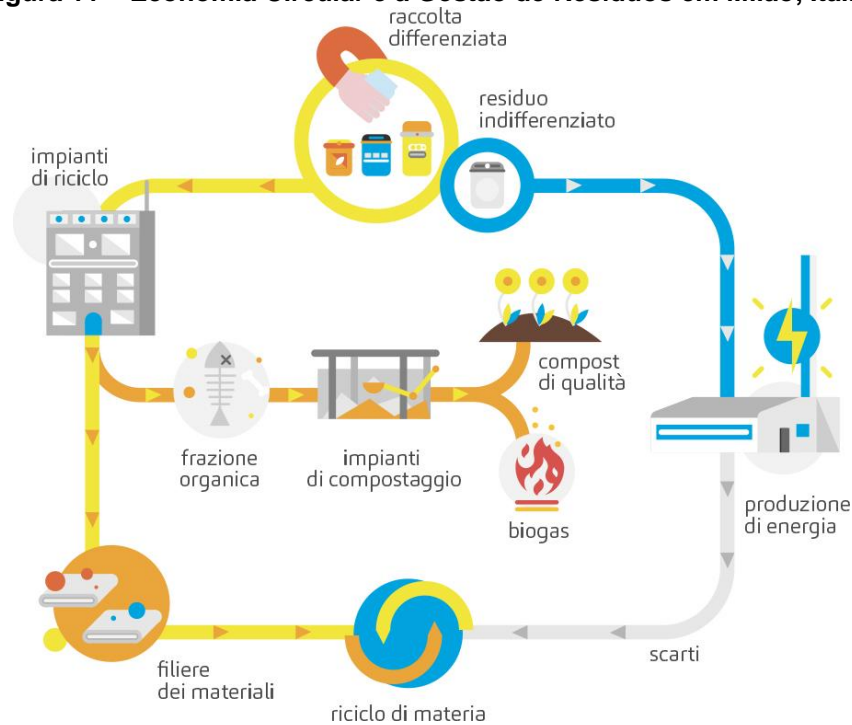
Inicialmente, conforme apresentado na revisão bibliográfica, a União Europeia estabeleceu um rigoroso decreto a respeito da economia circular, termo que, segundo Ribeiro e Kruglianskas (2014), ainda pouco difundido no Brasil. De acordo com os autores entende-se como fundamental acompanhar esta discussão e realizar desde cedo uma reflexão sobre o alcance destas estratégias na realidade brasileira. Principalmente na temática dos RSU esta abordagem seria de extrema importância, considerando o atual esforço de implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

O termo economia circular traz como proposta que os materiais sejam utilizados de modo que maximize seu valor, reduzindo a geração de resíduos e gerando benefícios econômicos e ambientais. Isto é obtido por meio da geração de riqueza a partir de processos alimentados não por meio de recursos naturais virgens, mas sim da recuperação dos recursos secundários, derivados do reuso ou da reciclagem dos resíduos (HOUSE OF COMMONS, 2014). É neste contexto que se encaixa as metodologias apresentadas neste trabalho.

Conforme a proposta da economia circular, a empresa A2A Ambiente adota metodologias para que os RSU possam estar nesta cadeia cíclica, e sendo sempre reaproveitados ao máximo, tanto como matéria quanto como energia. A começar pela coleta seletiva, a separação feita primeiramente pelo cidadão, que possui os armazenadores temporários com a coloração diferente para cada tipologia, para plástico, metal, vidro, papel, papelão e o orgânico.

Na Figura 11 é descrito o modelo de economia circular da empresa, o qual informa que seus resíduos recicláveis são encaminhados aos processos de reciclagem, o resíduo orgânico para a compostagem e produção de biogás e o rejeito encaminhado ao WTE para a produção de energia elétrica e térmica. Além disso, os resíduos da incineração também são encaminhados para o reaproveitamento. Quanto aos valores no município de Milão, 67,5% do resíduo coletado é encaminhado para reciclagem, 31,5% para usina WTE e 1% é encaminhado ao aterro sanitário aqueles que não possuem nenhum tipo de reaproveitamento, conforme A2A Ambiente (2020).

Figura 11 – Economia Circular e a Gestão de Resíduos em Milão, Itália.



Fonte: A2A Ambiente (2020)

Tais premissas têm apoiado a melhoria da gestão dos resíduos, estimulando a inovação, aumentando os índices de reciclagem, limitando o volume de resíduos encaminhados a aterros, reduzindo perdas em geral, além de influenciar em mudanças de comportamento (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

Conforme Silva, Toneli e Bereche (2019), o aproveitamento energético dos RSU, utilizando tecnologias apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de sua implementação, é uma alternativa ambientalmente adequada à gestão de resíduos. Isto porque, no cenário atual brasileiro, é essencial estudos de medidas para a redução da área necessária à destinação final dos resíduos. Atualmente, com o encaminhamento aos aterros sanitários, existe a preocupação com as grandes áreas degradadas e impactadas. Portella e Ribeiro (2014) afirmam que apesar de ser uma solução para os RSU, os aterros sanitários possuem grandes limitações devido o crescimento dos grandes centros urbanos, e conseqüentemente o aumento da quantidade de lixo produzida e descartada. Além de possuir uma capacidade limitada, áreas são cada vez mais difíceis de serem encontradas próximas dos centros urbanos, exigindo que caminhões de coleta percorram distâncias cada vez maiores para a disposição final. Para a sua adoção, é necessário que o município

trace metas para a não geração, redução, reutilização, reciclagem e, quando necessário, tratamento dos resíduos.

7 CONCLUSÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil vem apresentando evoluções, embora necessite de mais urgência por parte dos setores públicos no investimento a efetivos tratamentos mais eficazes e sustentáveis. Existe uma grande necessidade de desenvolvimento de estratégias, com o objetivo de um maior aproveitamento de resíduos como recursos energéticos, que atualmente no Brasil não são vistos desta maneira. É essencial que discussões sejam levantadas de o quanto é necessário mudar a visão sobre a gestão de resíduos sólidos, no qual é desprezado seu real valor e suas possibilidades de aproveitamento.

Com base nos estudos das realidades italiana e brasileira, percebe-se que existe uma demanda de maior aplicação de recursos para a coleta seletiva e de efetivas tecnologias para o tratamento final dos resíduos, devendo ser defendido como principais pilares dos investimentos nos próximos anos.

Neste estudo, a tecnologia *Waste-to-Energy* é levantada como uma alternativa para problemática levantada. Esta vem recebendo alta adesão nos países desenvolvidos e investimentos em modernizações, principalmente nos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes, se tornando uma alternativa com grande aceitabilidade em relação a unidades baseadas no tratamento térmico de resíduos.

Com relação aos resultados obtidos neste estudo, verificou-se que, com base nas características dos resíduos e adotando a tecnologia WTE, é possível aplicar a estratégia no município. Foi apresentada a estimativa do aproveitamento energético dos resíduos que atualmente são encaminhados ao aterro sanitário de Maringá-PR, o qual seria suficiente para gerar 5.781.600 kWh/mês de energia elétrica, conseqüentemente atendendo cerca de 35.470 residências mensalmente. Porém tal valor é aproximado, considerando que um estudo mais aprofundado sobre as características e demandas do município deve ser necessariamente analisado.

Considerando a qualidade do material utilizado como combustível, embora atinja o valor mínimo de PCI para ser encaminhado em tais usinas, ao ser submetido por uma etapa de pré-tratamento, ocorre a diminuição do material orgânico e umidade, aumentando o seu potencial e havendo um acréscimo do poder calorífico inferior em torno de 22,5%.

Como feito pela realidade italiana, caso a coleta seletiva fosse elevada, e a diminuição de plástico e papel encaminhado à usina e conseqüentemente um menos potencial de geração de energia, estratégias deveriam ser traçadas, como por exemplo, o recebimento de resíduos de outros municípios ou também os industriais.

Além disso, tal tecnologia contribui tanto para questões que envolvam a limpeza urbana, conservação do meio ambiente e principalmente como fonte de geração energética. Devido ao crescimento exponencial da necessidade de fontes de energia alternativas, esta tecnologia contribui para a descentralização da geração elétrica brasileira, uma vez que este é majoritariamente abastecido de hidroeletricidade.

A partir de tais resultados, este estudo poderá ser utilizado junto aos gestores públicos nas tomadas de decisão com relação aos resíduos sólidos urbanos ou que possuam interesse em avaliar a viabilidade de implantação de um sistema de aproveitamento energético.

As principais limitações da pesquisa foram em relação à revisão literária devido aos poucos estudos relacionados à tecnologia do WTE no Brasil, e quase inexistente com relação ao estado do Paraná e especificamente de Maringá. A não realização de uma etapa experimental e a falta de estudos anuais de composição gravimétrica dos resíduos de Maringá dificultou uma análise mais detalhada, considerando que as características dos resíduos possuem constantes alterações.

Recomenda-se que para trabalhos futuros seja realizada uma análise dos custos de operação e implantação do sistema a fim de verificar a viabilidade econômica de implantação de uma unidade WTE em Maringá-PR. Além disso, é recomendado um estudo aprofundado para a definição exata do número de residências atendidas. Sugere-se também um estudo quanto à instalação e análise do sistema de controle de poluição atmosférica.

REFERÊNCIAS

A2A AMBIENTE. **Termovalorizzatore Silla 2 - Relazione annuale sul funzionamento e la sorveglianza dell'impianto.** Milão, 2017. Disponível em: https://www.a2aambiente.eu/sites/default/files/pdf/silla_relazione_annuale_2017.pdf. Acesso em: 11 fev. 2020.

A2A AMBIENTE. **Termovalorizzatore Silla 2 - Dichiarazione Ambientale Aggiornamento 2019.** Milão, 2019. Disponível em: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/a2a-be/a2a/2019-05/silla2-%202019.pdf?null>. Acesso em: 11 fev. 2020.

A2A AMBIENTE. **La valorizzazione energetica della frazione residuale della raccolta differenziata in A2A Ambiente.** Milão, 2016.

A2A AMBIENTE. **Il nostro modello di economia circolare.** Disponível em: <https://www.a2aambiente.eu/node/59>. Acesso em: 06 abr. 2021.

ANALYSIS AND MONITORING OF ENVIRONMENTAL RISK - AMRA. **Ambiente rischio comunicazione: quadrimestrale di analisi e monitoraggio ambientale. Quadrimestrale di analisi e monitoraggio ambientale.** 6. ed. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019.** 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 20 set. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS – ABREN. **Proposta para o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES).** Brasília, 2020.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental.** 4. ed. São Paulo: Artmed, 2011.

BONOMI, M. **Le tecnologie di smaltimento del rifiuto solido urbano nell'era della raccolta differenziata**. 2000. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Economia) - Università Degli Studi del Piemonte Orientale, Novara, 2000. Disponível em: http://www.complexitec.org/public/Selezione_Tecnologie.pdf. Acesso em: 20 set. 2020.

BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente. Gabinete do Ministro. **Versão Preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wp-content/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Consulta-P%C3%ABlica.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2020.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.187%2C%20DE%209%20DE%20DEZEMBRO%20DE%202009.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20sobre,Art.. Acesso em: 06 abr. 2021

BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente. Gabinete do Ministro. Portaria Interministerial nº 274 de 30 de abril de 2019. **Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>. Acesso em: 13 abr. 2021.

CAIXETA, D. M. **Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: o caso de Campo Grande/MS**. 2005. Monografia (Especialização em Resíduos Sólidos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CAMACHO, J. L. P.; MATAI, P. H. L. S.; GUEDES, I. C.; NEIVA, A. **Determinação do Poder Calorífico de um Combustível Sólido ou Líquido pela Bomba Calorimétrica**. Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pqi2110/arquivos/apost-lab-qtg-2014.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2020.

CARNEIRO, M. L. N. M. **ANÁLISE TERMOCÔNOMICA E AMBIENTAL DE UMA USINA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**: estudo de caso da planta de zabalgardi/bilbao adaptada para a realidade brasileira. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CARRARO, C.; BOSELLO, F.; BOTTERI, M.; CAMPAGNOLO, L.; EBOLI, F.; MEDORO, M.; PARRADO, R. **Energia da rifiuti in Italia: potenzialità di generazione e contributo alle politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici**. Itália: Ecocerverd, 2010. 71 p. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?id=n-kDU9ZNvjEC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 20 set. 2020.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo, 2018. 316 p. Disponível em: http://cempre.org.br/upload/Lixo_Municipal_2018.pdf. Acesso em: 20 abr.2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002; Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 224, p. 92-95, 20 novembro 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006; Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 1, p. 131-137, 02 janeiro 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011; Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anterior a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 247, 26 dezembro 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 5, de 14 de junho de 1989; Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 14713-14714, 25 agosto 1989.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018; Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 155, 21 novembro 2018.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS – CEWEP. **Best Available Techniques for Waste Incineration**. Bruxelas, 2019. Disponível em: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2019/12/2019.12.03-CEWEP-PR-on-WI-BAT-Conclusions.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2021.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS – CEWEP. **Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2019**. Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2019/>. Acesso em: 17 mar. 2021.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS – CEWEP. **Waste-to-Energy Plants in Europe in 2018**. Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2018/>. Acesso em: 17 mar. 2021.

COPERAÇÃO PARA A PROTEÇÃO DO CLIMA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - PROTEGEER. **O que são Resíduos Sólidos?** 2018. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/rsu/o-que-sao>. Acesso em: 09 nov. 2020.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.** Eschborn, 2017. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/images/documents/393/WasteToEnergy%20Guidelines%20GIZ%202017%20-web%20PT.pdf>. Acesso em: 19 set. 2020.

DOTTI, D. **Trattamento Meccanico Biologico dei rifiuti residui da R.D.:** tecnologie, evoluzione del contesto e caso pratico. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia do Ambiente e Território) - Università di Bologna, Bologna, 2008.

DRUDI, K. C. R.; MARTINS, G.; TONELI, J. T. C. L.; DRUDI, R.; ANTONIO, G. C.. Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de São Bernardo do Campo Utilizando Lógica Fuzzy. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL*, 12., 2015, São Bernardo do Campo. **Anais [...]**. São Bernardo do Campo: Abricom, 2015. p. 1-6.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Projeção da demanda de energia Elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022).** Série Estudos Da Demanda Nota Técnica Dea 22/12. Rio de Janeiro, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande.** Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **DEA 18/14: Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro, 2014.

EUROPEAN COMMISSION - COM. **Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe.** Bruxelas: COM, 2014.

FONDAZIONE PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE. **L'Italia del Riciclo.** 2017. Disponível em: https://www.fondazionevilupposostenibile.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/12/Rapporto_Italia_del_riciclo_2017.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais.** Belo Horizonte, 2012.

GAIANO, V.; PIERI, S. **Bilancio energetico della co-combustione di Combustibile Solido Secondario (CSS) in impianti per la produzione di cemento.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Energética) - Politecnico di Milano, Milão, 2016.

GARZONE, P.; INNELLA, C.; DONATELLI, A.; IOVANE, P. Gassificazione combustibile solido secundario con aria in impianto scala banco. *In: SEMINARI DI ECOMONDO*, 2014, Rimini. **Anais [...]**. Rimini: Ecomondo, 2014. p 343-347.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 55, p. 215-228, 2005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10104>. Acesso em: 05 abr. 2021.

GRECO, L. **Studio di un Modello Prestazionale per il Trattamento Meccanico-Biologico dei Rifiuti Urbani**. 2014. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente e Território) - Politecnico di Milano, Milão, 2014.

HOUSE OF COMMONS. **Growing a circular economy: Ending the throwaway society**. HC-214. Londres: House of Commons/ Environmental Audit Committee. julho, 2014. Disponível em: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201415/cmselect/cmenvaud/214/214.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2021

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Ibge Cidades, 2019**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 set.2020.

IOVANE, P.; MISTRETTA, CIVITA, R.; INNELLA, C.; MARTINO, M.; DIMATTEO, S. ROMANELLI, A.; GARZONE, P. Valorizzazione Combustibile Solido Secundario (CSS) mediante gassificazione con aria e vapore. *In: SEMINARI DI ECOMONDO*, 2014, Rimini. **Anais [...]**. Rimini: Ecomondo, 2014. p 163-168.

ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA - ISTAT. **Rapporto Annuale 2019: la situazione del paese**. Roma, 2019.

ITÔ, L. C. M. **Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica Com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ITÁLIA. Gazzetta Ufficiale (2006). Decreto nº 152, de 3 de abril de 2006. **Norme in Materia Ambientale**. Roma, 2006.

ITÁLIA. Gazzetta Ufficiale (1997). Decreto nº 22, de 5 de fevereiro de 1997. **Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti de imballaggio**. Supplemento Ordinario nº33. Roma, 1997.

KEARNS, D. T. **Waste-to-Energy with CCS: A pathway to carbon-negative power generation**. Global CCS Institute, 2019.

LUCATTI, T. B. M.; ACHON, C. L.; REIS, R.F; CORDEIRO, J.S; AKUTSU, J. - Estudo do Processo de Biossecagem de Lodo de Ete. *In: CONGRESSO ABES/FENASAN. 1., 2017, São Paulo. Anais [...].* São Paulo: ABES, 2017. p. 1-11.

MACHADO, C. F. **Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MASTRO, F. L.; MISTRETTA, M. Analisi energetica di un impianto motore cogenerativo finalizzato alla termoutilizzazione ottimale dei rsu alla luce della legislazione vigente. *In: CONGRESSO NAZIONALE ATI, 56.,2001, Napoli. Anais [...]* Napoli: Università degli Studi di Napoli Federico II , 2001. p 1-14.

MAVROPOULOS, A; NEWMAN, D. **Wasted Health: The Tragic Case of Dumpsites.** ISWA - International Solid Waste Association, Viena, 2015.

MICHELON, R. Il Nuovo Pacchetto Ue Sull'economia Circolare. **Ecoscienza**, Bologna, v. 3, p. 60-61, 2018.

MORATORIO, D.; ROCCO, I.; CASTELLI, M. Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía. **Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica**, Montevideo, v. 10, p. 115-126, 2012.

NAIME, R. **Destinação final em Aterro Sanitário.** 2012. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2012/05/03/destinacao-final-em-aterro-sanitario-artigo-de-roberto-naime/>. Acesso em: 20 out. 2020.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil.** 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PALERMO, G. C.; GOMES, A. P. P. **Tratamento e Gestão de Resíduos.** Rio de Janeiro: Universidade Veiga de Almeida, 2017. 173 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318859013_Tratamento_e_Gestao_de_Residuos_Waste_Treatment_and_Management. Acesso em: 14 mar. 2021.

PARANÁ COOPERATIVO. **Energia Elétrica: Consumo no Paraná cai 5,9% no segundo trimestre.** 2020. Disponível em: <http://www.paranacooperativo.coop.br/ppc/index.php/sistema-ocepar/comunicacao/2011-12-07-11-06-29/ultimas-noticias/129203-energia-eletrica-consumo-no-parana-cai-59-no-segundo-trimestre#:~:text=Consumo%20m%C3%A9dio%20%2D%20O%20consumo%20m%C3%A9dio,por%20unidade%20consumidora%2C%20em%20m%C3%A9dia>. Acesso em: 09 jan. 2021.

PORTELLA, M.; RIBEIRO, J. C. J. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, Caxias do Sul, v. 4, n. 1, p. 115-134, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MARINGÁ. **Plano Municipal de Gestão Integrada De Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Maringá – PR**. Maringá – PR, 2017. Disponível em: <https://www.cmm.pr.gov.br/residuosSolidos/plano.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020

RANZINI, D. **Analisi tecnico-economica di un sistema integrato di gestione dei rifiuti (MBT+WtE)**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Energética) - Politecnico di Milano, Milão, 2013. Disponível em: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/86742>. Acesso em: 20 set. 2020.

RIBEIRO, F. M.; KRUGLIANSKAS, I. A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA)*, 6., 2014, São Paulo. **Anais[...]**. São Paulo: Engema, 2014.

SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE MARINGÁ - SEMUSP. **Processo nº129**. Maringá, 2020.

SENAGA, M. **Termelétrica do Aterro Bandeirantes reduz emissão de CO2 para atmosfera**. 2004. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2004/03/25/termelétrica-do-aterro-bandeirantes-reduz-emissao-de-co2-para-atmosfera/>. Acesso em: 13 mai 2021.

SILVA, E. R; TONELI, J. T. C. L.; PALACIOS-BERECHE, R. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Santo André, v. 24, n. 2, p. 347-357, abr. 2019.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 993-1003, out. 2017.

SONIA, R. C. **Analisi e ottimizzazione di un inceneritore di rifiuti**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Università Degli Studi di Padova, Padova, 2011.

TECU, M. **La gestione del rifiuto secco non riciclabile. I casi di Padova e Treviso, inceneritore o CDR?**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração e Controle) - Università Ca' Foscari Venezia, Veneza, 2012.

TISI, Y. S. A. B. **Waste-To-Energy: Recuperação energética como forma ambientalmente adequada de destinação dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: Synergia, 2019. 240 p.

TISI, Y. S. A. B. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos - ABREN. **Regulação Nacional e Internacional de Waste-to-Energy**. Brasília, 2019.

Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/36104/939446/3.+Yuri+Schmitke+-+ABREN.pdf/67a6a1f5-7cbc-6727-1f5c-ffabbbb190ff>. Acesso em: 21 set. 2020.

VAN ELK, A. G. H. P. **Mecanismos de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: Redução de emissões na disposição final**. Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM. Ministério do Meio Ambiente. Rio de Janeiro, 2007. 40 p.

ZAGHENI, M. **Metodologia per il calcolo dell'indice R1 dei termovalorizzatori di rifiuti: valutazione dell'accuratezza ed ulteriori campi di applicazione**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Politécnico di Milano, Milão, 2015.

ZANTA, V.M; FERREIRA, C.F.A. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. *In*: BORGES, A.C. (ED.). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2003. p.1-18.

APÊNDICE A - Valores Médios dos PCI dos resíduos

Tabela A-1- Média dos valores de PCI de resíduos sólidos

Resíduo	CARRARO et. al (2010)		ZAGHENI (2015)		SONIA (2011)		MASTRO E MISTRETТА (2001)			Média
	MJ/kg	kcal/kg	MJ/Kg	kcal/kg	KJ/kg	kcal/kg	KJ/Kg	MJ/kg	kcal/kg	kcal/kg
Papel/papelão			10,84	2589,1	12100	2889,48	10805	10,805	2580,8	2686,46
Madeira			13,94	3329,6	13800	3295,44	7608	7,608	1817,2	2814
Plástico			25,63	6121,7	28300	6758,04	34631	34,631	8271,6	7050,46
Orgânico			5,42	1294,6	2100	501,48	2470	2,47	589,96	795,34
Têxtil			15,9	3797,7	14200	3390,96	14492	14,492	3461,4	3550,03
Resíduos de Limpeza Urbana					6040	1442,35	7608	7,608	1817,2	1630
Ferro				0						0
Vidro				0						0
Inertes								0	0	0
Borracha					20800	4967,04	35384	35,384	8451,5	6709
Outros Resíduos Inferiores	3,9	931,52	8,06	1925,1		0	5589	5,589	1334,9	1630
Lodo de tratamento			10,37	2476,9	4350	1038,78				1172

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela A-2- Média dos valores de PCI de resíduos sólidos

Resíduo	IOVANE (2014)		GAIANO E PIERI (2016)		GARZONE et al (2012)		MÉDIA
	MJ/kg	kcal/kg	MJ/Kg	kcal/kg	MJ/Kg	kcal/kg	kcal/kg
Rejeitos da reciclagem	18,6	4442,61	16,167	3861,5	18,55	4430,66	4245

Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela A-3- Média dos valores de PCI de resíduos sólidos

Resíduo	AMRA (2013)	SONIA (2011)	TECU (2012)		MÉDIA
	kcal/kg	kcal/kg	KJ/kg	kcal/kg	kcal/kg
Medicamentos/RSS	2000	4226,13			3113
CDR			15000	3582	3582

Fonte: Autoria Própria (2020)