



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**INCINERAÇÃO COMO ROTA TECNOLÓGICA PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NO MUNICÍPIO DE FOZ DO
IGUAÇU, ESTADO DO PARANÁ**

CRISTHIAN ROLANDO AGUERO DOMINGUEZ

Foz do Iguaçu - PR
2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**INCINERAÇÃO COMO ROTA TECNOLÓGICA PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NO MUNICÍPIO DE FOZ DO
IGUAÇU, ESTADO DO PARANÁ**

CRISTHIAN ROLANDO AGUERO DOMINGUEZ

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker

Foz do Iguaçu - PR
2024

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

D671i

Dominguez, Cristhian Rolando Agüero.

Incineração como rota tecnológica para aproveitamento dos resíduos sólidos gerados no município de Foz do Iguaçu, Estado do Paraná / Cristhian Rolando Agüero Dominguez. - Foz do Iguaçu, 2024.

80 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.


Orientador: Márcia Regina Becker.

1. Gestão integrada de resíduos sólidos - Foz do Iguaçu. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Correntes elétricas. I. Becker, Márcia Regina. II. Título.

INCINERAÇÃO COMO ROTA TECNOLÓGICA PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU, ESTADO DO PARANÁ

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

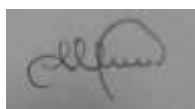
BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARCIA REGINA BECKER**
Data: 27/02/2024 08:51:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **JIAM PIRES FRIGO**
Data: 27/02/2024 09:30:38-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Jiam Pires Frigo
UNILA



Prof. Dr. Isonel Sandino Meneguzzo
UEPG

Foz do Iguaçu, 28 de fevereiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e acompanhamento diário, por estar sempre do meu lado e guiar meus passos em todo momento.

Aos meus pais, por serem meu maior exemplo de sacrifício e perseverança, pelo apoio incondicional na minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus irmãos, por serem meus mentores desde os inícios na vida acadêmica até hoje.

À minha orientadora Dra. Márcia Regina Becker, por todo o acompanhamento, predisposição e ensinamentos durante este processo.

Ao Programa Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade, pela oportunidade de cursar o Mestrado Acadêmico no Brasil e o apoio financeiro como bolsista através do programa PROBIU.

Ao setor da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu e à empresa Vital Engenharia Ambiental pelos dados disponibilizados no desenvolvimento da pesquisa.

“Sonhos determinam o que você quer.
Ação determina o que você conquista”
Novak, 2012

AGÜERO DOMINGUEZ, C.R. **Incineração como rota tecnológica para aproveitamento dos resíduos sólidos gerados no município de Foz do Iguaçu, Estado do Paraná.** 80 páginas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Integração Latino-americana. Foz do Iguaçu, 2024.

RESUMO

A gestão e tratamento de resíduos sólidos representa um grande desafio para as gestões municipais no Brasil. Existe uma tendência de crescimento gradual no volume de geração *per capita* nos próximos anos, devido a um acelerado aumento da produção industrial, urbanização e crescimento demográfico. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a proposta da incineração como rota tecnológica para tratamento de resíduos sólidos e o potencial de aproveitamento energético associado a este processo. Para tanto, a metodologia se baseou no levantamento de informações técnicas e dados referentes ao panorama histórico e atual da gestão dos resíduos no Brasil e a nível municipal, caracterizando o volume gerado durante o período de 2014 a 2022, os quais foram obtidos a partir de documentos emitidos por órgãos oficiais do Estado e empresas particulares responsáveis pela limpeza urbana. Uma estimativa de geração futura foi realizada, verificando o crescimento gradual para os próximos anos. O Poder calorífico inferior médio foi calculado com base em aproximações das frações que compõem o resíduo sólido do município e a média nacional, resultando num valor de 2.179 kcal/kg. A partir disto, foi realizado o dimensionamento de uma usina de geração de energia baseado no método *Waste-to-energy* pelo processo de incineração, definindo uma operação de 4320 horas anuais da planta, resultando numa potência elétrica mensal disponibilizada na rede de 2.419.200 kWh, capaz de suprir a demanda de energia elétrica de aproximadamente 14.521 residências no município de Foz do Iguaçu. Os parâmetros de viabilidade socioambiental mostraram uma receita equivalente a R\$ 2,77 milhões anuais, assim como um valor de investimento inicial aproximado de R\$ 45 milhões para a instalação da planta de incineração, que conforme a análise econômica, terá uma Taxa Interna de Retorno igual a 32% e tempo de recuperação de investimento de 4 anos e 2 meses, tornando a proposta favorável.

Palavras-chave: Gestão de resíduos; energia alternativa; potência elétrica; recuperação energética.

AGÜERO DOMINGUEZ, C.R. **Incineración como ruta tecnológica para aprovechamiento de los residuos sólidos generados en el municipio de Foz do Iguaçu, Estado de Paraná.** 80 páginas. Disertación de Maestría – Universidad Federal de Integración Latinoamericana. Foz do Iguaçu, 2024.

RESUMEN

La gestión y tratamiento de residuos sólidos representa un gran desafío para las gestiones municipales en el Brasil. Existe una tendencia de crecimiento gradual en el volumen de generación *pér capita* en los próximos años, debido a un acelerado aumento de la producción industrial, urbanización y crecimiento demográfico. El objetivo de la investigación fue evaluar la propuesta de la incineración como ruta tecnológica para tratamiento de residuos sólidos y el potencial de aprovechamiento energético asociado a este proceso. Para tal efecto, la metodología fue basada en la colecta de informaciones técnicas y datos referentes al panorama histórico y actual de la gestión de residuos sólidos en el Brasil y a nivel municipal, caracterizando el volumen generado durante el período de 2014 a 2022, los cuales fueron obtenidos a partir de documentos emitidos por órganos oficiales del Estado y empresas particulares responsables por la limpieza urbana. Una estimativa de generación futura fue realizada, verificando el crecimiento gradual para los próximos años. El Poder Calorífico Inferior medio fue calculado con base en aproximaciones de las fracciones que componen el residuo sólido del municipio y la media nacional, resultando en un valor de 2179 kcal/kg. A partir de esto, fue realizado el dimensionamiento de la usina de generación de energía basado en el método Waste-to-energy por el proceso de incineración, definiendo una operación de 4.320 horas anuales de la planta, resultando en una potencia eléctrica mensual disponible en la red de 2.419.200 kWh, capaz de atender a la demanda de energía eléctrica de aproximadamente 14.521 residencias en el municipio de Foz do Iguaçu. Los parámetros de viabilidad socioambiental mostraron una ganancia equivalente a R\$ 2,77 millones anuales, así como un valor de inversión inicial aproximado de R\$ 45 millones para la instalación de la planta de incineración, que conforme análisis económico, tendrá una Tasa Interna de Retorno igual a 32% y tiempo de recuperación de inversión de 4 años y 2 meses, resultando en una propuesta favorable.

Palabras clave: Gestión de residuos; energía alternativa; potencia eléctrica, recuperación energética.

AGÜERO DOMINGUEZ, C.R. **Incineration as a technological route for the use of solid waste generated in the municipality of Foz do Iguaçu, State of Paraná.** 80 pages. Master's Dissertation – Federal University of Latin American Integration. Foz do Iguaçu, 2024.

ABSTRACT

The management and treatment of solid waste represents a major challenge for municipal administrations in Brazil. There is a trend of gradual growth in the volume of generation *per capita* in the coming years, due to an accelerated increase in industrial production, urbanization and demographic growth. In this sense, the National Solid Waste Policy presents the main guidelines regarding integrated waste management, in which the use of energy recovery technologies stands out, provided that its technical and environmental viability has been proven. The objective of the research was to evaluate the proposal of incineration as a technological route for treating solid waste and the potential for energy use associated with this process. For this purpose, the methodology was based on the survey of technical information and data referring to the historical and current panorama of waste management in Brazil and at the municipal level, characterizing the volume generated during the period from 2014 to 2022, which were obtained from documents issued by official state bodies and private companies responsible for urban cleaning. An estimation of future generation was carried out, verifying the gradual growth for the coming years. The average Lower Calorific Power was calculated based on approximations of the fractions that make up the municipal solid waste and the national average, resulting in a value of 2179 kcal/kg. From this, the dimensioning of the power generation plant was carried out based on the Waste-to-energy method by the incineration process, defining an operation of 4320 annual hours of the plant, resulting in a monthly electric power available in the network of 6.602.400 kWh, capable of supplying the electricity demand of approximately 39.606 homes in the municipality of Foz do Iguaçu. The socio-environmental viability parameters showed a profit equivalent to R\$ 2.77 million annually, as well as an approximate initial investment value of R\$ 45 million for the installation of the incineration plant, which according to economic analysis, will have an Internal Rate of Return equal to 32% and investment recovery time of 4 years and 2 months, resulting in a favorable proposal.

Key words: Waste management; alternative energy; electrical power; energy recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de um Aterro Sanitário	21
Figura 2 – Distribuição de resíduos sólidos segundo tipo de tratamento na UE	22
Figura 3 – Distribuição de resíduos sólidos segundo tipo de tratamento nos EUA	24
Figura 4 – Crescimento do número de incineradores na China entre 2004 e 2018	24
Figura 5 – Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022	26
Figura 6 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil	27
Figura 7 – Vista Panorâmica do aterro municipal de Foz do Iguaçu	29
Figura 8 – Lagoas de estabilização para tratamento de chorume gerado no aterro	32
Figura 9 – Unidade compacta de osmose reversa para tratamento de chorume	33
Figura 10 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e produtos finais	34
Figura 11 – Vista geral dos equipamentos e incinerador da Usina Verde, RJ.	37
Figura 12 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e produtos finais	38
Figura 13 – Proporções de cogeração de energia produzida no sistema WTE	39
Figura 14 – Incinerador de resíduos sólidos municipais	40
Figura 15 – Modelos de sistemas de grelhas	42
Figura 16 – Incinerador de leito fluidizado do tipo <i>circulating</i>	44
Figura 17 – Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil	53
Figura 18 – Geração média mensal de RSU em Foz do Iguaçu (2014-2022)	55
Figura 19 – Previsão de estimativa de geração média de RSU no município (2022-2042)	57
Figura 20 – Payback simples (Tempo de retorno de investimento) da proposta	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões por tipo de destinação	27
Tabela 2 – Informações e características de unidades de incineração em operação	36
Tabela 3 – Usos potenciais de cinza proveniente de incineração de resíduos sólidos	45
Tabela 4 – Tecnologias para a redução de emissões provenientes da incineração de RSU	48
Tabela 5 – Quantificação do PCI dos materiais no RSU (média nacional)	57
Tabela 6 – Parâmetros de operação e potência para a usina WTE	59
Tabela 7 – Receitas obtidas pelos créditos de carbono da geração de energia	62
Tabela 8 – Receitas obtidas a partir do uso do sistema de incineração proposto	63
Tabela 9 – Custo de investimento e operação da planta de incineração de resíduos	73
Tabela 10 – Fluxo de caixa para análise econômica da proposta	75
Tabela 11 – Parâmetros de decisão econômica da proposta	76

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEWEP	Confederation of European Waste-to-energy plants
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESWET	European Suppliers of Waste to Energy
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
NBR	Norma Brasileira
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RS	Resíduo Sólido
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UE	União Europeia
UVR	Unidade de Valorização de Resíduos
VPL	Valor Presente Líquido
WTE	Waste to Energy

LISTA DE SÍMBOLOS

Qt	Capacidade de processamento e incineração de RSU
t	Toneladas
Pt	Potência térmica
Pe	Potência elétrica do gerador
F	Tempo de funcionamento da planta de incineração
Q	Quantidade total de RSU disponíveis no município (anual)
h	Hora
kWh	Quilowatt-hora
kWe	Quilowatt-elétrico
MWt	Megawatt térmico
kJ	Quilojoule
kg	Quilograma
PCI	Poder calorífico inferior
C	Carbono
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
N	Nitrogênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	15
3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos	17
3.1.2 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos	18
3.1.3 Formas de tratamento e destinação final dos RSU	19
3.2 PANORAMA MUNDIAL	22
3.3 PANORAMA NACIONAL	25
3.3.1 Geração de RSU	26
3.3.2 Coleta de RSU	26
3.3.3 Destinação Final de RSU	26
3.4 PANORAMA ESTADUAL	27
3.4.1 Geração de RSU	27
3.4.2 Tratamento e triagem de RSU	28
3.4.3 Associações e Cooperativas de Catadores de Materiais Recicláveis	28
3.5 PANORAMA NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU	28
3.5.1 Histórico da gestão dos RS	28
3.5.2 Aterro Sanitário Municipal	29
3.5.3 Programa de Coleta Seletiva	30
3.5.4 Custos de operação do aterro municipal de Foz do Iguaçu	31
3.6 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS	33
3.6.1 Incineração de resíduos	34
3.6.2 Parâmetros de operação do processo de incineração	37
3.6.3 Tecnologia <i>Waste-to-energy</i> para incineração de resíduos sólidos	39
3.6.4 Tipos de incineradores	40
3.6.5 Cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos	44
3.6.6 Aspectos ambientais na incineração de resíduos	46
3.6.7 Tratamento de emissões atmosféricas das usinas WTE	47
3.6.8 Legislação ambiental aplicada ao uso de usinas WTE no Brasil	48
4 OBJETIVOS	51
4.1 OBJETIVO GERAL	51
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	51

5 METODOLOGIA	52
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS	52
5.2 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA E PROPOSTA DE APROVEITAMENTO DE RS	52
5.3 PODER CALORÍFICO DOS RS	52
5.4 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RS.....	53
5.5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	54
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1 CÁLCULO DO VOLUME DE GERAÇÃO MÉDIA MENSAL DE RSU	55
6.2 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FUTURA DE RSU NO MUNICÍPIO	56
6.3 CÁLCULO DO PCI ASSOCIADO AO RS MUNICIPAL.....	57
6.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA WTE E GERAÇÃO DE ENERGIA.....	58
6.5 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E POTÊNCIA OBTIDOS	58
6.5.1 Capacidade de processamento e incineração da usina.....	59
6.5.2 Potência térmica a ser gerada	59
6.5.3 Potência elétrica do gerador	59
6.5.4 Potência elétrica mensal disponibilizada na rede	59
7 ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS DA PROPOSTA	60
7.1 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL.....	60
7.1.1 Gases de efeito estufa gerados pelos resíduos sólidos.....	60
7.1.2 Créditos de carbono e incineração de resíduos.....	61
7.2 ANÁLISE ECONÔMICO	62
7.2.1 Receitas	62
7.2.2 Custos	63
7.2.3 Análise de investimento e parâmetros econômicos.....	64
8 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	68
ANEXOS	73

1 INTRODUÇÃO

O acelerado processo de globalização e consumismo tem induzido os indivíduos a um aumento na geração de resíduos e materiais de descarte, aliado ao crescimento demográfico constante, ocasionando mudanças no perfil de geração de resíduos ao longo dos últimos anos. Com o avanço da imunização da população contra a COVID-19 e a retomada de boa parte das atividades presenciais, as dinâmicas sociais passaram por novas mudanças, o que influenciou diretamente os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (ABRELPE, 2022). A partir dessa retomada, os centros de geração de resíduos foram novamente deslocados dos domicílios para escritórios, escolas, centros comerciais, entre outros locais. Além disso, o modelo híbrido de trabalho passou a ser adotado em maior escala, levando a uma diversificação de locais de descarte de resíduos, mas fazendo com que as residências também tenham um papel relevante na geração de resíduos.

Os maiores desafios que condicionam a geração de resíduos está associada a uma gestão eficiente e estratégica, principalmente quanto ao seu descarte e destinação final, pois existem problemas diversos associados, como a falta de planejamento a longo prazo, a dificuldade na caracterização adequada dos tipos de resíduos e os potenciais associados conforme a sua composição, a disponibilidade de espaços para destinação, aspectos sociais envolvidos, como também os interesses políticos.

A falta de tratamento, disposição e destinação de forma adequada dos resíduos compromete a fauna, a flora, os recursos hídricos, entre outros, afetando direta ou indiretamente todos os seres vivos causando diversos impactos ambientais (Marques, 2011).

Além disso, o crescente processo de urbanização demanda de maior produção e consumo de energia elétrica, o que está diretamente ligado ao estilo de vida da população (Slatter, 2002). Com base nos dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), temos que o consumo da energia elétrica teve um aumento aproximado de 12,8% nos últimos cinco anos, em todos os setores produtivos.

Neste sentido, é válido ressaltar a proposta da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída no ano de 2010 no Brasil pela Lei 12.305, a qual dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, as responsabilidades dos geradores e do poder público, entre outros aspectos. O município de Foz do Iguaçu, localizado no Estado do Paraná, possui um sistema de gestão de resíduos estabelecido, principalmente direcionado pelo Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), que traz as orientações e encaminhamentos necessários, assim

como a proposta de soluções ambientais implementadas por meio de iniciativas e projetos em fase de desenvolvimento no município.

Uma destas iniciativas de maior destaque implementada nos últimos anos no município, a partir do ano de 2019, é referente ao Programa de Coleta Seletiva, visando a classificação dos resíduos domiciliares gerados, antes da sua coleta, com a finalidade de facilitar a sua separação por tipo, os quais são encaminhados após a coleta, em locais denominados de Unidades de Valorização de Resíduos, para um novo processo de separação e classificação de resíduos, de maneira a aproveitar os materiais recicláveis para a sua comercialização, por parte das empresas cooperativas associadas ao programa de reciclagem. Além disso, é importante destacar que o PMSB apresenta as informações referentes à estrutura organizacional de gestão de resíduos no município, número de funcionários, logística administrativa e operacional, entre outros aspectos.

Cabe ressaltar que os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) têm a sua origem resultante das atividades domésticas e dos resíduos de limpeza urbana, sendo proveniente da varrição de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza (BRASIL, 2012). A sua geração em volumes cada vez maiores e em constante aumento representa um desafio para as gestões políticas e ambientais na definição de soluções para a minimização desta problemática.

Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada uma ordem de prioridade, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, onde se destacam a reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Dentre estas alternativas, destaca-se a proposta de tratamento dos resíduos sólidos alinhada com a temática central desta pesquisa, que realiza o estudo do sistema de tratamento mediante o método *Waste-to-energy*, alinhada à recomendação da política mencionada, que propõe o uso de tecnologias visando a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental. 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).

Assim, considerando a problemática exposta, esta pesquisa aponta a avaliar o potencial de aproveitamento energético mediante a geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos gerados e coletados no município de Foz do Iguaçu, mediante a metodologia de tratamento “*Waste-to-energy*”, visando a sua implementação como proposta de gestão ambiental nos próximos anos.

2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

No decorrer da história, a globalização tem transformado significativamente a sociedade contemporânea, principalmente nas últimas décadas. Neste processo, o crescimento populacional e socioeconômico tem gerado algumas consequências e desafios, como a gestão adequada do volume de resíduos gerados. Segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), cerca de 3.000 dos 5.570 municípios do país mantêm lixões a céu aberto, e quase metade estão em locais ambientalmente inadequados.

Existem rotas tecnológicas desenvolvidas e consolidadas amplamente no mundo, as quais são estratégias implementadas para o adequado descarte, armazenamento, coleta e destinação final de resíduos. Nesse contexto, a incineração de resíduos sólidos tem se destacado como uma alternativa eficaz e sustentável para lidar com o crescente desafio global da gestão de resíduos. Ela apresenta várias vantagens significativas que podem contribuir para a redução do impacto ambiental e a promoção da sustentabilidade.

A adoção de tecnologias que permitem realizar o processamento de materiais possibilita o reaproveitamento e gestão eficiente dos resíduos. Este é o caso do sistema *Waste-to-energy*, trazendo a proposta da cogeração, mediante a incineração de resíduos e a produção de energia na forma térmica e elétrica. O funcionamento e implementação da tecnologia tem como principal objetivo contribuir na redução do volume total de resíduos gerados, que é consideravelmente elevada. Mediante o processo de incineração, temos a redução entre 70 a 90% do volume total, restando apenas o material inerte, que são as cinzas.

Destaca-se esta pesquisa e a proposta apresentada com foco principal na incorporação de sistemas e tecnologias que permitam a redução do volume de resíduos gerados, e contribuir de maneira complementar com a energia que pode ser gerada no processo. Além disso, a redução no volume total dos resíduos sólidos permite uma contribuição no aumento da vida útil dos aterros sanitários, evitando o requerimento de ampliação cada vez maior e a utilização de áreas de solo para depósito de resíduos, que podem ser agentes de contaminação e passivo ambiental de águas e solo subterrâneo.

Além disso, o processo de incineração adequadamente controlado, apresenta vantagens importantes como a eliminação de resíduos perigosos, entre eles produtos químicos tóxicos, evitando a poluição de cursos hídricos, áreas verdes, entre outros. É importante ressaltar que, embora a incineração ofereça vantagens, seu sucesso depende da implementação responsável e da adoção de tecnologias modernas que minimizem os impactos ambientais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Conforme a ABNT NBR n° 10.004 (2004) os resíduos sólidos são aqueles que resultam das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), em seu artigo 3°, define resíduos sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010, p.2).

Conforme Vilhena (2000), a classificação dos resíduos sólidos é dada da seguinte forma:

- 1) por sua natureza, como seco ou úmido;
- 2) pela sua composição química, como matéria orgânica ou inorgânica;
- 3) pelos riscos potenciais ao meio ambiente, como perigosos e não perigosos;
- 4) pela sua origem, como urbanos, de serviços de saúde, portos, aeroportos, agrícolas e industriais.

De acordo com a NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

a) Classe I ou perigosos

São aqueles que, em função de suas características tóxicas, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

b) Classe II ou não inertes

São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I, ou perigosos.

c) Classe III ou inertes

São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e, que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.004, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solúveis a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

c) Classe III ou inertes

São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e, que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.004, e submetidos a um contato estático ou dinâmico, com água destilada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solúveis, a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

A origem é o principal elemento para a caracterização de resíduos sólidos. Segundo este critério, os diferentes tipos de resíduos podem ser agrupados em espécies de classes:

I) Resíduo doméstico ou residencial

São os resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.

II) Resíduo comercial

São os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida. Nas atividades de limpeza urbana, os tipos “domésticos” e “comerciais” constituem o chamado “resíduo domiciliar”, que, junto com o resíduo público, representa a maior parcela dos resíduos sólidos produzidos nas cidades.

O grupo de resíduo comercial, assim como o entulho de obras, pode ser dividido em subgrupos chamados de “pequenos e grandes geradores”.

III) Resíduos públicos

São os resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral restaurantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos.

IV) Entulhos de obra

A indústria da construção civil é a que mais explora recursos naturais. Além disso, a construção civil também é a indústria que mais gera resíduos. No Brasil, a tecnologia construtiva normalmente aplicada favorece o desperdício na execução das novas edificações. Enquanto em países desenvolvidos, a média de resíduos proveniente de novas edificações encontra-se abaixo de 100 kg/m² edificado. No Brasil este índice gira em torno de 300 kg/m².

V) Resíduo industrial

São os resíduos gerados pelas atividades industriais. São resíduos muito variados que apresentam características diversificadas, pois estas dependem do tipo de produto manufaturado. Devem, portanto, ser estudados caso a caso. Adota-se a NBR 10.004 da ABNT para se classificar os resíduos industriais: Classe I (Perigosos), Classe II (Não-inertes) e Classe III (Inertes).

VI) Resíduo radioativo

Assim considerados os resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. No Brasil, o manuseio, acondicionamento e disposição final do resíduo radioativo está a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

VII) Resíduo agrícola

Formado basicamente pelos restos de embalagens impregnadas com pesticidas e fertilizantes químicos, utilizados na agricultura, que são perigosos. Portanto, o manuseio destes resíduos segue as mesmas rotinas e se utilizam os mesmos recipientes e processos empregados para os resíduos industriais Classe I. A falta de fiscalização e de penalidades mais rigorosas para o manuseio inadequado destes resíduos faz com que sejam misturados aos resíduos comuns e dispostos nos vazadouros das municipalidades, ou o que é pior sejam queimados nas fazendas e sítios mais afastados, gerando gases tóxicos.

VIII) Resíduos de Serviços de Saúde

É aquela porção que pode estar contaminada com vírus ou bactérias patogênicas das salas de cirurgia e curativos, das clínicas dentárias, dos laboratórios de análises, dos ambulatórios e até de clínicas e laboratórios não localizados em hospitais, além de biotérios e veterinárias.

3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) diferenciou os Resíduos

Sólidos Urbanos (RSU) de rejeitos quaisquer. Os RSU são objetos, materiais ou substâncias descartadas depois de uma ação humana na sociedade. Os resíduos podem ser aproveitados de várias formas, enquanto os rejeitos não podem e devem ser descartados da melhor maneira para criar o menor impacto possível. Os RSU mais conhecidos como rejeitos, são provenientes de restos de atividades humanas consideradas pelos geradores como inúteis ou indesejáveis, podendo apresentar-se na forma semissólida ou semilíquida (IPT, 1998).

Outro termo que aparece nos estudos sobre resíduos é a palavra lixo. Em uma linguagem técnica, este termo pode ser definido como resíduos sólidos representados por materiais inservíveis e descartados pelas atividades humanas. Até meados do século XVIII o lixo era essencialmente de sobras de alimentos e produzido em pequena quantidade. Com a revolução industrial, e a produção em massa, teve início uma nova fase, o consumo em larga escala e o surgimento das embalagens, o que fez com que a quantidade e diversidade dos resíduos aumentassem muito (Onaisi, 2017).

A gestão dos resíduos sólidos integra os serviços urbanos que englobam: água e esgoto sanitário, limpeza das ruas, estradas, espaços públicos e iluminação de ruas. Os RSU podem ser matéria orgânica, como restos de comida e resíduos da preparação, papel, papelão e derivados, plásticos, vidro, metais, restos obtidos da limpeza das cidades, eventuais outros resíduos.

3.1.2 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

A caracterização do RSU pode ser realizada através do seu peso específico, volume gerado, composição química, umidade e poder calorífico. Esta caracterização é importante para dimensionar o sistema de coleta como um todo. O peso específico é importante para dimensionamento das características da frota de veículos coletores, o número de estações de transbordo e os incineradores. O volume gerado é determinante para previsão do número de veículos coletores, sua capacidade e características técnicas, entre outros aspectos. A partir dos dados da composição química, é possível obter informações sobre o teor de oxigênio, hidrogênio, carbono e enxofre, determinando assim a quantidade de ar necessária nos incineradores, câmeras e demais componentes de um sistema de incineração.

Outros parâmetros importantes para a caracterização dos RSU são detalhados a seguir:

- a) Poder calorífico: é a energia liberada pela combustão total à pressão constante de um quilograma de combustível;
- b) Poder calorífico superior (PCS): é a quantidade de calor liberada para queimar

completamente um quilograma de combustível, resultando gás carbônico e água no estado líquido;

- c) Poder calorífico inferior (PCI): é a quantidade de calor liberada para queimar completamente um quilograma de combustível resultando na produção de gás carbônico e vapor de água.

O PCI é o parâmetro obtido a partir do PCS, de onde se subtraiu a energia de vaporização da água existente e formada, sendo o parâmetro mais utilizada na caracterização energética de combustíveis, considerando os demais ajustes requeridos de acordo com as características de cada equipamento, através dos parâmetros operacionais e a condição específica do RSU empregado. No processo de dimensionamento de uma planta de incineração, a determinação do valor do Poder Calorífico Inferior (PCI) associado aos RSU analisados, é de fundamental importância, pois este parâmetro define a capacidade de queima dos materiais e o potencial energético associado. A diferença entre o PCS e o PCI corresponde a entalpia de vaporização da água originada na combustão.

De acordo com Silva (1998), o poder calorífico do RSU pode ser determinado experimentalmente ou a partir das porcentagens em massa dos diferentes componentes (papel, matéria orgânica, tecidos, etc.).

A composição do RSU é influenciada por vários fatores: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população, condições climáticas e sazonais, e mudanças na política econômica de um país. Os dados referentes à composição química dos resíduos sólidos domésticos são de grande importância na avaliação de processos alternativos e opções de reciclagem. A possibilidade de implementar técnicas de tratamento de resíduos como a incineração são aplicáveis a partir da caracterização e composição química do material. O potencial energético associado pode ser determinado em laboratório, empregando-se calorímetros ou estimado por cálculos baseados na composição elementar dos componentes integrantes dos resíduos domésticos. Em caso de interesse em aplicações no aproveitamento biológico dos resíduos domésticos, as informações referentes aos nutrientes essenciais são muito importantes para obter um processo equilibrado e eficiente na conversão.

3.1.3 Formas de tratamento e destinação final dos RS

Conforme ABRELPE (2023), a disposição final é uma das alternativas de destinação final ambientalmente adequadas previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), desde que observadas as normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou

riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. As principais alternativas adotadas são apresentadas conforme a seguir:

a) Reciclagem

É o processo pelo qual os resíduos podem ser reintroduzidos no processo produtivo para assim serem re-elaborados, gerando um novo produto. Para que seja possível um processo de reciclagem, é preciso do estabelecimento de uma logística de coleta e classificação prévia. Este método, segundo Castro (2002), representa a opção mais importante para a qualidade vida ambiental e humana, já que mediante a sua adoção, são gerados direta e indiretamente empregos, como também são evitados problemas ambientais, sociais e de saúde pública, além do baixo custo associado em relação a outros processos.

b) Compostagem

Representa umas das mais antigas técnicas de reciclagem, sendo um processo natural que consiste em processar materiais orgânicos, ricos em nutrientes, os quais serão decompostos por microrganismos aeróbicos e anaeróbicos, os quais são utilizados posteriormente como adubo (Castro, 2002).

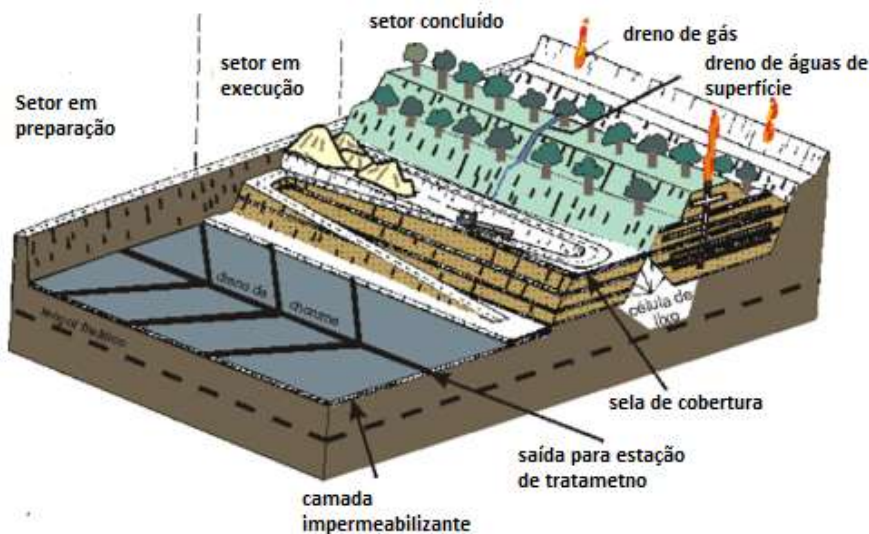
Uma das vantagens principais da compostagem é referente ao adubo produzido, o qual contribui na prevenção do solo contra erosões, além de aumentar a sua umidade, controlar o pH (impedindo a alcalinização ou acidificação do solo) e fornecer importantes nutrientes ao mesmo. Esta aplicação é dada aos resíduos classificados como materiais orgânicos, pois outro tipo de materiais podem ser prejudiciais ao solo (tornando-o poluído).

c) Aterro Sanitário

Conforme definido pela NBR 8419/1992, representa uma técnica de disposição de resíduos sólidos o qual, através de princípios da engenharia, confina os resíduos e diminui o volume total, realizando a cobertura com camadas de terra (ABNT, 1992). São obras destinadas à estocagem e armazenamento dos resíduos sólidos gerados pelos aglomerados urbanos (Portella, Ribeiro, 2014).

Na Figura 1 é apresentado o esquema de um aterro sanitário com as estruturas necessárias para uma adequada segurança ambiental.

Figura 1 – Estrutura de um Aterro Sanitário.



Fonte: NAIME, 2012.

As células sanitárias funcionam como reatores dinâmicos que, mediante reações químicas e biológicas, produzem biogás e efluentes líquidos (lixiviado, chorume) e húmus (Van Elk, 2007). Alguns requisitos para o seu adequado funcionamento são necessários, conforme detalhados na NBR 8419/1992, a qual 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 da saúde, além da elaboração de um manual de operação e descrição do uso futuro do terreno após o encerramento (ABNT, 1992). No processo de funcionamento do aterro, também são aplicados outros processos técnico-operacionais com a finalidade de evitar a proliferação de vetores de doenças, exalação de mau cheiro, contaminação de lençóis freáticos e poluição visual (Portella; Ribeiro, 2014).

d) Incineração

A incineração consiste em um processo de queima, na presença de excesso de oxigênio, no qual os materiais constituídos a base de carbono são decompostos, produzindo calor, cinzas e gases de combustão. O processo de incineração ocorre, no incinerador, sendo um equipamento composto por câmaras de combustão, onde os resíduos são queimados em temperaturas de 800 a 1000°C (IBAM, 2001). Conforme Caixeta (2005), as principais vantagens desta tecnologia são a redução de massa e volume do resíduo descartado, a possibilidade de recuperação de energia, redução de impactos ambientais, eliminação de vírus e bactérias, destruição completa ou parcial de substâncias tóxicas, complementação de outras

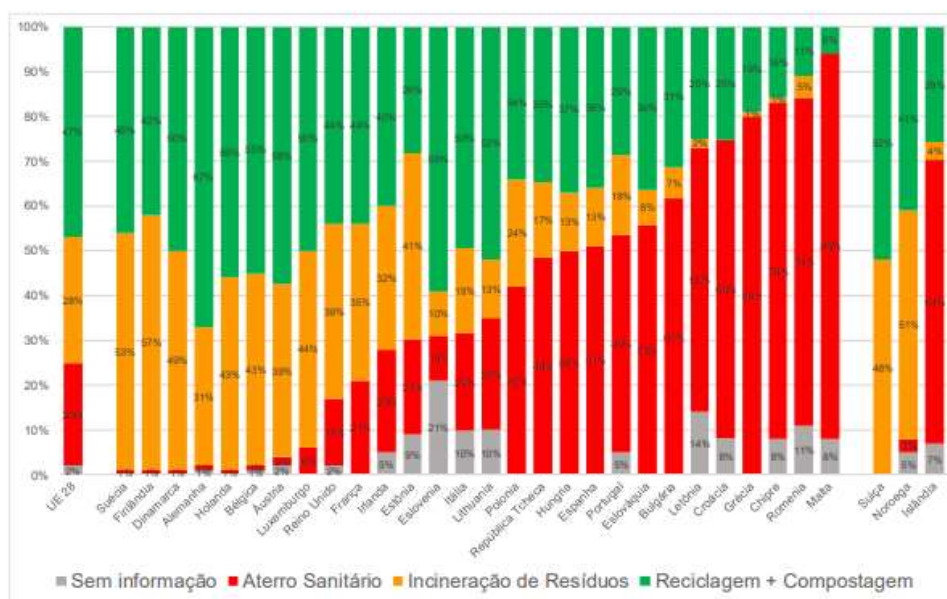
formas de destinação final de resíduos, como a reciclagem e a compostagem. Em países com pouca disponibilidade de área para aterros sanitários, vem apresentando um crescimento em relação a essa destinação final dos resíduos, principalmente devido aos sistemas de recuperação de energia e tratamento de gases de combustão mais eficientes, sendo uma metodologia ambiental e economicamente viável, quando implantada de acordo com a legislação ambiental em vigor (Senaga, 2004).

Como é possível notar, os resíduos são de origens diversas e compostos de variados elementos químicos. Por este motivo, é necessária uma classificação correta para cada tipo e a forma de destinação final a ser adotada.

3.2 PANORAMA MUNDIAL

A tecnologia de incineração como estratégia para tratamento de resíduos sólidos urbanos tem sido amplamente adotada nos países industrializados como os Estados Unidos, Japão, Dinamarca e a União Europeia. Existem em torno de 2.450 plantas de incineração ativas no mundo (ECOPROG, 2019). Conforme dados da *Confederation of European Waste-to-Energy plants*, CEWEP, em 2019, 28% dos resíduos sólidos produzidos nos 28 países da União Europeia (UE) foram encaminhados para incineração, 47% foram reciclados e/ou direcionados para aterros sanitários. Na figura 2, é possível observar que existem algumas diferenças importantes entre alguns países membros da UE.

Figura 2 – Distribuição dos resíduos sólidos segundo tipo de tratamento e destinação final na UE (2019).



Fonte: Adaptado de CEWEP, 2019.

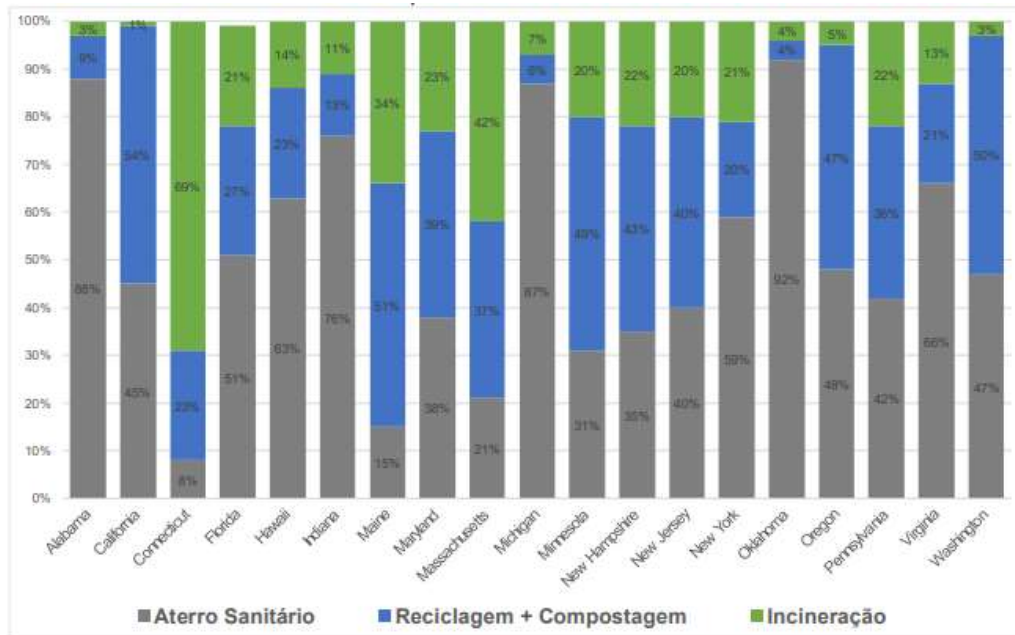
Temos por uma parte países que levam apenas 1% dos seus resíduos gerados para o aterro sanitário, adotando o sistema de incineração, compostagem e reciclagem em praticamente a totalidade dos seus resíduos. Por outro lado, existem países que não contam com a tecnologia de incineração para o tratamento dos seus resíduos. O principal fator associado nesta questão é referente aos custos associados à implantação de uma tecnologia complexa e a capacidade de investimento para a sua aquisição, assim como a própria organização da gestão dos resíduos nestes países (Jardim *et al.*, 2018).

Na Europa, atualmente, já existem mais de 500 fábricas em operação, algumas das quais estão localizadas em muitas cidades europeias importantes, incluindo Paris, Dublin, Viena, Copenhague e Barcelona, e também estão muito bem integradas com o seu entorno. Ao transformar lixo em tesouro através da geração de energia limpa, estas cidades estão a dar um exemplo de desenvolvimento urbano sustentável, ao mesmo tempo que mitigam os desafios associados aos crescentes volumes de resíduos. À medida que a tecnologia continua a avançar, é provável que a transformação de resíduos em energia desempenhe um papel ainda mais significativo no futuro sustentável da Europa (ESWET, 2023).

A diferença dos países da Europa, os Estados Unidos possuem áreas de grande extensão, posicionando o aterro sanitário como uma solução mais atrativa, em período de médio a curto prazo, considerando o custo baixo para a sua implantação e funcionamento, em comparação com a proposta de incineração (ENERGY, 2020). Outros países como o Japão e países da Europa tem outro cenário completamente diferente, devido à limitação em quanto ao tamanho da área e população densa.

Nos Estados Unidos, em 2018, existiam 58 plantas de incineração distribuídas em 20 estados (Michaels, Krishnan, 2018). A combustão de resíduos sólidos é responsável por uma fração do tratamento de resíduos sólidos, conforme apresentado na Figura 3, destacando a distribuição por tipo de tratamento e destinação final dos resíduos, em 20 estados.

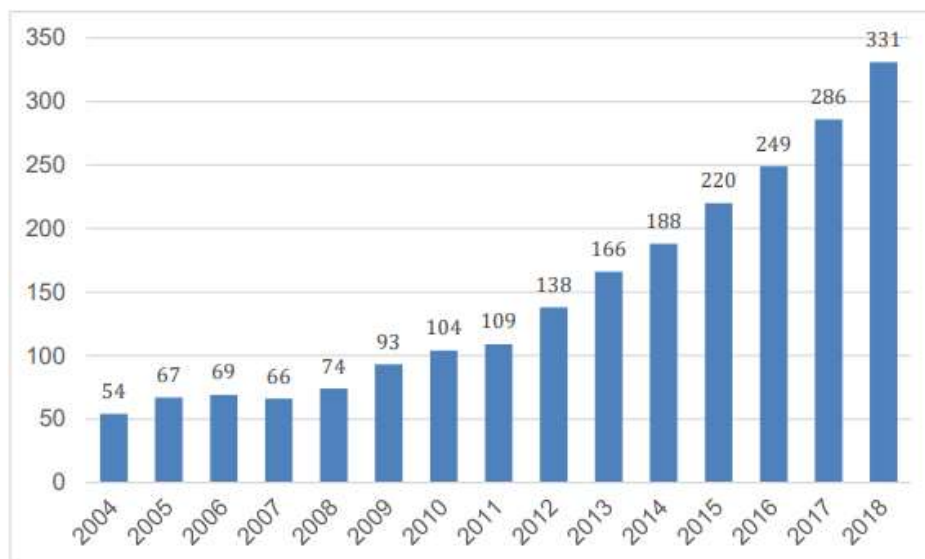
Figura 3 – Distribuição dos resíduos sólidos segundo tipo de tratamento e destinação final em 20 estados dos EUA (2018).



Fonte: Adaptado de Michaels; Krishnan (2018)

No caso da China, a diferença dos Estados Unidos, tem mostrado um grande crescimento na adoção do sistema de incineração. O fator principal é devido a que o país conta com grande área de extensão, porem extremamente populoso. Na Figura 4 é possível observar o crescimento em número de plantas de incineração instaladas na China nos últimos 15 anos.

Figura 4 – Crescimento do número de incineradores na China entre os anos de 2004 e 2018



Fonte: Adaptado de NATIONAL (2020)

Conforme a figura 4, é possível destacar que, em 15 anos, houve um crescimento aproximado de 612% no número total de plantas de incineração instaladas.

Desta forma, destaca-se que na China, os principais métodos de tratamento e disposição final de resíduos são a incineração e os aterros sanitários, sendo que algumas mudanças no processo de destinação vêm ocorrendo nos últimos anos (CHI, 2017). A tendência na gestão integrada dos resíduos no país aponta a uma redução no uso dos aterros sanitários e um aumento das plantas de incineração, motivada principalmente pela limitação de áreas disponíveis para a construção de mais aterros (CHI, 2017)

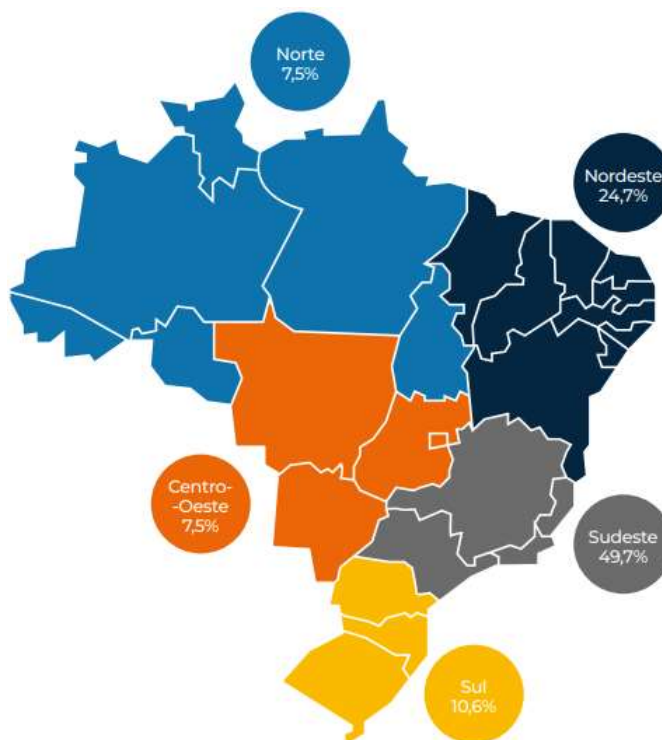
3.3 PANORAMA NACIONAL

3.3.1 Geração de RSU

A Figura 5 sintetiza informações sobre a geração de RSU no Brasil durante o ano de 2022, conforme a região do país, tendo alcançado um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia. A partir dos dados registrados em 2022, observa-se que o montante de RSU gerados no país apresentou uma curva regressiva. As possíveis razões podem estar relacionadas às novas dinâmicas sociais, com a retomada da geração de resíduos nas empresas, escolas e escritórios, com a menor utilização dos serviços de entrega em comparação ao período de maior isolamento social e por conta da variação no poder de compra de parte da população (ABRELPE, 2023).

Regionalmente e nos moldes dos anos anteriores, a região com maior geração de resíduos continua sendo a Sudeste, com cerca de 111 mil toneladas diárias (aproximadamente 50% da geração do país) e uma média de 450 kg/hab/ano, enquanto a região Centro-Oeste representa pouco mais de 7% do total gerado, com cerca de 6 milhões de toneladas/ano, a menor dentre as regiões. Em termos de geração diária por habitante, as variações regionais mostraram-se bastante latentes, com a região Sudeste apresentando uma geração média de 1,234 kg/hab/dia, a maior do país e, na outra ponta, a região Sul com uma média de 0,776 kg/hab/dia (ABRELPE, 2023).

Figura 5 – Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022.



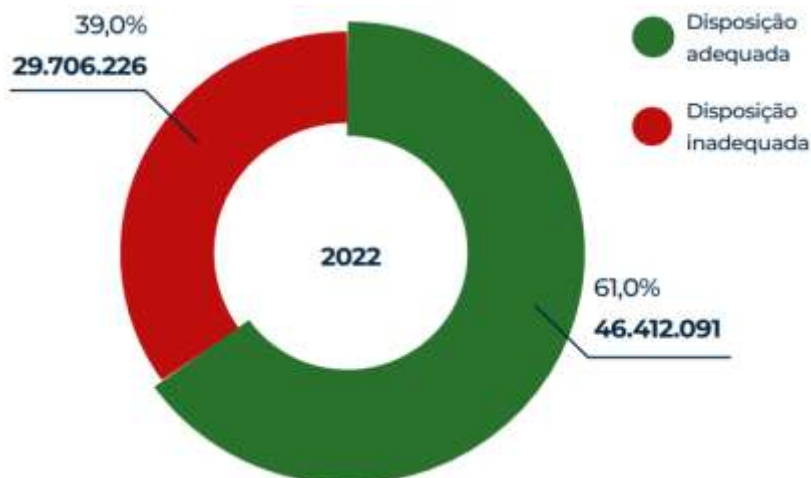
Fonte: ABRELPE, 2023.

3.3.2 Coleta de RSU

Com relação à coleta de RSU, em 2022 o país registrou um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas, levando a uma cobertura de coleta de 93%. Importante ressaltar que, conforme já verificado anteriormente, enquanto as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste já alcançaram índice de cobertura de coleta superior à média nacional, as regiões Norte e Nordeste ainda apresentam índices que se aproximam de 83%, deixando boa parte da população sem acesso aos serviços de coleta regular de RSU nessas regiões.

3.3.3 Destinação final RSU

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados (61%) continua sendo encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada em 2022. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada. A Figura 6 apresenta o percentual em termos de disposição adequada em relação à disposição inadequada de RSU no Brasil, referente ao ano de 2022, respectivamente.

Figura 6 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %), ano 2022.

Fonte: ABRELPE, 2023.

A Tabela 1 a seguir, apresenta os dados detalhados sobre as disposições adequada e inadequada, realizando o comparativo conforme as regiões do Brasil, referente ao ano 2022.

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação (t/ano e %), ano 2022.

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.870.470	36,6%	3.240.105	63,4%
Nordeste	6.214.527	37,2%	10.491.191	62,8%
Centro-Oeste	2.532.762	43,5%	3.288.281	56,5%
Sudeste	29.773.638	74,3%	10.298.552	25,7%
Sul	6.020.694	71,6%	2.388.097	28,4%
Brasil	46.412.091	61,0%	29.706.226	39,0%

Fonte: ABRELPE (2023)

3.4 PANORAMA ESTADUAL

3.4.1 Geração de RSU

Segundo dados do Plano Estadual de Resíduos Sólidos - PERS, o Paraná gera anualmente 3,47 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano (ano de referência 2017), ou seja, aqueles originários de atividades domésticas e dos serviços de limpeza urbana – varrição, limpeza de logradouros e vias públicas – e aqueles gerados em atividades comerciais

e industriais que tenham características similares aos resíduos domésticos. Dos 399 municípios do Estado, 56,1% deles possuem destinação adequada dos seus resíduos, enquanto 40,4% possuem destinação inadequada (outros 3,5% apresentaram informações divergentes). No entanto, ao utilizar o dado da população de cada um dos municípios, o índice obtido é de 67% dos habitantes do Estado atendidos com disposição adequada de RSU. Esses números indicam que, apesar de estar acima da média nacional, o Estado do Paraná precisa resolver o problema de vários municípios que continuam destinando seus resíduos de forma inadequada, causando problemas ambientais e riscos à saúde humana.

3.4.2 Tratamento e triagem de RSU

No estado do Paraná, as atividades de tratamento de RSU acontecem na cadeia de triagem dos resíduos recicláveis secos, reciclagem dos materiais recicláveis secos e compostagem dos resíduos orgânicos. A triagem é realizada a partir dos resíduos brutos coletados pela coleta regular ou de materiais recicláveis secos previamente segregados nas residências e coletados de forma diferenciada pela coleta seletiva.

3.4.3 Associações e Cooperativas de Catadores de Materiais Recicláveis

No estado do Paraná não existe uma fonte de informações única e centralizada que registre todas as associações ou cooperativas de catadores atuantes, os municípios onde estão situadas, o número de trabalhadores envolvidos e, ainda, os catadores informais (não organizados em associações ou cooperativas) (Paraná, 2017). Uma das fontes de dados adotada se dá a partir do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná, onde se encontram informações sobre trezentos e cinquenta e sete municípios, o Planejamento Estadual e execução de ações na gestão de resíduos, Instrumentos de planejamento adotados, entre outros aspectos. Destes, duzentos e quinze (215) possuem associações ou cooperativas em seu território, enquanto cento e quarenta e dois (142) não possuem. Para quarenta e dois (42) municípios não foi possível obter informações (Paraná, 2017).

3.5 PANORAMA NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU

3.5.1 Histórico da gestão dos Resíduos sólidos

Segundo dados do Plano Municipal de Saneamento Básico (2019), a coleta de resíduos no município teve seus inícios na década de 1960, sendo o local de destinação final o lixão localizado no bairro Arroio Dourado. Este local possuía uma área total de 145.981,94 m²,

sendo encerrado oficialmente no ano de 1992 (Foz do Iguaçu, 2019). O aumento da população no município, principalmente com as obras de construção da usina hidrelétrica Itaipu Binacional resultaram no aumento considerável de residentes no município, aumentando para 190.125 em 1991 e 231.596 em 1996, conforme dados realizados no censo desse ano (Foz do Iguaçu, 2019). A adequação para a nova área destinada ao aterro sanitário iniciou-se no ano de 1997, recebendo a sua licença ambiental de operação no ano 2001. Um ano anterior a isso, foi criada a Lei municipal 2.356, prevendo o serviço de coleta nos domicílios e locais comerciais de geração, para a sua disposição final no aterro sanitário, destacando que neste período, existiam catadores informais também conhecidos como recicladores nos locais do aterro, garimpendo os materiais que eram ali destinados.

3.5.2 Aterro Sanitário Municipal

No município de Foz do Iguaçu, o órgão responsável por grande parte do sistema de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos é a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA), dependente da Prefeitura Municipal, com apoio de outras secretarias para serviços específicos: Secretaria Municipal de Saúde, Secretaria Municipal de Obras, Secretaria Municipal de Planejamento e Captação de Recursos e Secretaria Municipal de Educação.

Em relação ao funcionamento do aterro sanitário, a empresa responsável no município é a VITAL Engenharia Ambiental, sob contrato de concessão junto com a Prefeitura Municipal, a qual é responsável pelas etapas de coleta e disposição final dos resíduos.

Figura 7 – Vista panorâmica do aterro municipal de Foz do Iguaçu, ano 2022.



Fonte: Registrado pelo autor.

O aterro sanitário está localizado na porção noroeste da cidade, entre os bairros Porto Belo e Jardim Califórnia, ocupando uma área total de 389.737,44 m². Os resíduos gerados na cidade, são encaminhados ao aterro, mediante o serviço de coleta realizado maiormente pela empresa VITAL Engenharia Ambiental, em conjunto com a Prefeitura Municipal, e em menor proporção, pelos serviços particulares, especificamente na coleta e destinação final dos resíduos da construção civil. A distância média do aterro ao centro da cidade é de 20 km aproximadamente, sendo o seu acesso principal pela Avenida Tancredo Neves (km 4,5), sentido centro/Itaipu Binacional.

Atualmente, o aterro sanitário conta com um local específico para a disposição dos resíduos inertes, assim como 3 células para o recebimento e acondicionamento dos resíduos provindos da coleta domiciliar. No ano 2022 foi realizada a solicitação de ampliação para a construção de mais uma célula para a disposição dos resíduos domiciliares, conforme informado pela empresa responsável do aterro no município. Além disso, o aterro conta com uma área destinada ao aproveitamento dos resíduos orgânicos por meio de compostagem, principalmente dos resíduos de frutas e verduras em decomposição, provenientes da Central Estadual de Abastecimento do município de Foz do Iguaçu (CEASA).

Estima-se que são destinados anualmente ao aterro sanitário em torno de 302.603,50 toneladas de resíduos, sendo 137.079,38 deles orgânicos, 129.211,69 recicláveis e o restante rejeitos (Adaptado de VITAL ENGENHARIA, 2018).

3.5.3 Programa de Coleta Seletiva

Desde o ano 2003, existiram várias tentativas da implementação de um programa de coleta seletiva, os quais não tiveram sucesso devido à falta de investimento financeiros, principalmente para a construção dos locais de armazenamento temporário e os equipamentos requeridos, resultando apenas em iniciativas de práticas voluntárias para a separação dos resíduos nos domicílios. Já no ano de 2017, foi realizada a etapa de diagnóstico inicial para a verificação da situação atual no município, na tentativa da implementação do programa de coleta seletiva, mediante a Criação do Programa Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Recicláveis (PMGIRR).

No ano 2018, mediante Termo de Colaboração entre o Governo do Estado do Paraná, Itaipu Binacional e a Cooperativa dos Agentes Ambientais (COAAFI), foi realizada a formalização da Primeira Fase da implantação do Programa de Coleta Seletiva no município, a partir da logística de coleta mecanizada dos resíduos porta a porta nos domicílios, a partir da contratação de equipe técnica e motoristas, manutenção dos caminhões destinados à coleta

seletiva, uniformes, equipamentos de proteção individual, entre outros.

A segunda fase do programa, executada de maneira parcial no ano de 2018, com maiores investimentos realizados nos anos 2019 e 2020, teve como objetivo a construção e melhoria de barracões destinados ao armazenamento de resíduos sólidos domiciliares de maneira temporal, denominados posteriormente como Unidades de Valorização de Resíduos (UVR), os quais funcionam como centros destinados à separação, armazenagem e destinação de resíduos, após a sua minuciosa classificação, conforme o tipo, sendo estes: plástico, papel, metal, vidro, rejeitos, com a finalidade de reaproveitar todos aqueles resíduos com potencial de reciclagem. Neste ponto, é importante destacar que, mediante o processo de concessão do serviço de operação das UVR's às cooperativas, centenas de catadores tem a oportunidade de exercer as suas funções de maneira digna, segura e saudável, além de ter uma atividade mais rentável e contribuindo com a economia das suas famílias.

Atualmente, são seis UVR's instaladas e em operação no município de Foz do Iguaçu, desde o início do Programa de Coleta Seletiva, com perspectivas de ampliação e construção de novas unidades nos próximos anos.

3.5.4 Custos de operação do aterro municipal de Foz do Iguaçu

Atualmente, o município de Foz do Iguaçu conta com apenas o aterro sanitário como alternativa de solução ambiental para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos. Considerando os custos gerados pelo serviço contratado pela Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu, junto com a empresa responsável no município, existe uma inversão atual realizada, equivalente a R\$ 2.657.404,22 mensais em conceito do serviço de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos no aterro municipal, cujo contrato de concessão foi renovado em agosto de 2013, pelo período de 15 anos a partir desta data. Cabe ressaltar que neste valor estão incluídos os serviços operativos de coleta de resíduos "urbanos", ou seja, aqueles gerados nos domicílios e atividades comerciais, sendo que resíduos inertes e os provenientes da construção civil, são de responsabilidade direta do gerador para a sua destinação final. Uma das dificuldades principais encontradas na gestão dos resíduos, é referente ao aproveitamento dos materiais inertes, que atualmente são destinados ao aterro sanitário, sendo descartados em locais não adaptados e sem previsão de estratégias para o seu aproveitamento como sub-materiais de segunda mão.

Figura 8 – Lagoas de estabilização para tratamento de chorume gerado no aterro municipal



Fonte: Registrado pelo autor (2022).

Em relação aos sistemas de inovação adotados dentro do aterro, é importante destacar que existe um sistema de tratamento de efluentes gerados, neste caso, o chorume proveniente da deposição dos resíduos sólidos nas células, os quais são encaminhados primeiramente até umas lagoas de estabilização mediante drenos, onde permanece armazenado até sua recirculação, através de bombeamento e aspersores, em áreas impermeabilizadas dentro do aterro.

Posteriormente, o chorume é direcionado por bombeamento até o local de tratamento, onde existe uma Unidade Compacta de osmose reversa, instalada em setembro de 2019. Nesta estação, o chorume passa por diferentes etapas de filtração e tratamento químico. O processo de tratamento começa por uma pré-filtração, onde são removidas as partículas maiores, passando por filtros de areia e de cartuchos. Depois disso, o pH do chorume é controlado por um sistema de dosagem de ácido sulfúrico e em seguida passa por um processo físico de filtração, sendo pressurizado e encaminhado para o sistema de membranas da osmose reversa. No final do processo, o produto obtido resulta em água que pode ser reutilizada para várias ações, como lavagem de veículos e irrigação (CATVE, 2023). Em total são tratados aproximadamente 40 metros cúbicos de água por dia. Quanto ao investimento, a estação de tratamento teve um custo inicial de implantação de R\$ 1.800.000. Cabe ressaltar que o seu funcionamento traz vantagens ambientais importantes, mais também gera elevados custos operacionais. A Figura 9 apresenta a estrutura interna do sistema de tratamento de chorume instalado dentro do aterro municipal de Foz do Iguaçu.

Figura 9 – Unidade Compacta de osmose reversa para tratamento de chorume.



Fonte: Registrado pelo autor (2022).

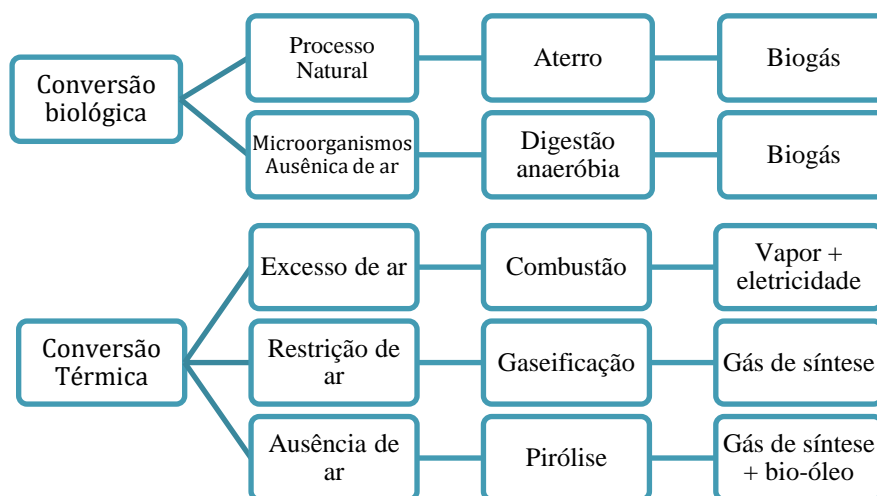
A previsão de vida útil do aterro é até 2.039, prazo que pode diminuir caso haja o aumento da geração de resíduos pela população. Levando em consideração os elevados custos associados ao funcionamento do aterro sanitário, tanto para a sua manutenção quanto a tratamento de resíduos e efluentes gerados, alternativas sustentáveis e inovadoras são sumamente importantes, considerando a previsão de geração de resíduos nos próximos anos e a demanda cada vez maior em termos de custos para o funcionamento adequado do aterro, sendo necessária a implementação de sistemas complementares que permitam contribuir com o aumento da capacidade de tratamento de resíduos e conseqüentemente a vida útil do aterro.

3.6 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Existem diferentes alternativas de tratamento de RS buscando seu aproveitamento energético, considerando tanto os aspectos ambientais quanto as oportunidades de negócio envolvidas. A busca sobre distintos modelos de conversão de energia tendo como insumo principal os RS vem crescendo desde os anos 70. A partir da ideia, os RS passaram a ser vistos não apenas como um efluente das pessoas e razão de preocupação para órgãos públicos responsáveis, mas também como insumos capazes de gerar rendimentos e atrair investidores para este segmento. Além disso, foi vista uma perspectiva para minimizar impactos negativos gerados pela sua má disposição (RSA, 2004).

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética, a escolha da estratégia e tecnologia mais apropriada é realizada mediante o conhecimento e análise da quantidade de RS coletado e a sua disposição final. Na Figura 10 são detalhadas algumas tecnologias de reaproveitamento energético de resíduos e seus principais produtos.

Figura 10 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e seus respectivos produtos finais.



Fonte: Drudi *et al.* (2010).

No Brasil, a geração de energia elétrica a partir de RS, mediante conversão térmica, ainda se encontra em fase de estudo e/ou implantação em escala piloto (EPE, 2008). Nos aterros sanitários, esta geração de energia é realizada, apenas, a partir da recuperação de metano, sendo que o seu Balanço Energético Nacional não é apresentado (Milanez e Massukado, 2012).

Considerando tal cenário, o processo de incineração se apresenta como uma oportunidade de forma inovadora para a geração de energia elétrica a partir da queima de RS (Tolmasquim, 2003). De maneira isolada sem seu aproveitamento energético, a incineração de resíduos sólidos é utilizada no tratamento dos resíduos de serviços de saúde e de alguns dos industriais (Pavan, 2010).

3.6.1 Incineração de resíduos

Conforme definido pela ABNT (1990), incineração de resíduo sólido é o processo que trata da oxidação a alta temperatura, reduzindo o seu volume ou recuperando materiais ou substâncias presentes. Segundo Lima (1991), a incineração é o processo de redução de peso e volume do resíduo sólido através da combustão controlada e em temperaturas elevadas. Os remanescentes são geralmente gases (CO₂, SO₂, N₂, gases inertes provenientes do ar e do próprio resíduo e oxigênio do ar em excesso), água, cinzas e escórias que se constituem por metais ferrosos e inertes, como vidros e pedras.

O principal atrativo desta tecnologia é a possibilidade de diminuir o volume total

de resíduos para valores entre 4% a 10% do volume total de resíduos gerados a serem destinados ao aterro sanitário, destacando a sua eficiência no processo de conversão de energia com resíduos. O sistema de incineração acarreta na produção de alguns subprodutos associados ao processo, como o caso das cinzas, as quais, por serem resíduos inertes, tem potencial de aproveitamento na construção civil (recapeamento de estradas, tijolos, etc.).

O método de incineração vem sendo amplamente utilizado e aperfeiçoado desde o seu surgimento na Inglaterra no século XVIII. Nas últimas décadas, mediante políticas de incentivo e tecnologias desenvolvidas, ele tem sido vinculado ao aproveitamento energético.

No Brasil, o primeiro incinerador municipal foi instalado em 1896 em Manaus para processar 60 toneladas por dia de resíduo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Outro equipamento similar foi instalado em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos (Menezes, 2000).

No Rio de Janeiro, a partir de 1950, observa-se a proliferação do emprego de incineradores residenciais, principalmente em edificações mais altas, e de vários andares, como solução descentralizada para a destinação final dos resíduos sólidos. Cerca de 20 anos depois, com o desenvolvimento do sistema de coleta pública municipal de RSU e restrições ambientais devido a emissão difusa de gases poluentes, sem qualquer tipo de controle, este modelo foi abolido (Henriques, 2004).

Além disso, para o processamento de resíduos hospitalares, aeroportuários e industriais, incineradores também foram objeto de implantação no país a partir de 1970. Uma grande quantidade de incineradores de porte muito pequeno e com baixa capacidade de processamento, inferior a 100 kg/hora, foram instalados em estabelecimentos e serviços de saúde. A grande maioria destes encontra-se desativada ou é operada mediante elevadas emissões de poluentes atmosféricos e em desconformidade com a legislação ambiental.

Já em 1994, por iniciativa da administração da cidade de São Paulo, um projeto previa a construção de dois grandes incineradores, com capacidade de processamento de 2.500 t/d cada. Dificuldades diversas ocorreram no sentido de sua viabilidade técnica e econômica, destacando-se a indefinição quanto às fontes e o valor de remuneração dos serviços prestados e à oferta de garantias ao empreendedor pela concessão de serviços de longo prazo, bem como a forte pressão contrária exercida por parte da opinião pública, baseada em receio quanto aos impactos ambientais do projeto (Henriques, 2004). A Tabela 2 resume as principais

informações e características de unidades de incineração em operação no País.

Tabela 2 – Informações e características de unidades de incineração em operação no país.

Planta	Tecnologia	Tipo	Capacidade (t/ano)	Tipos e características dos resíduos	Tratamento dos gases	Destino final das cinzas
BASF Guaratinguetá SP	Inter-Uhde	Rotativo	2700	Sólido, líquido, pastoso. Exceto ascarel	Lavadores ácido e alcalino, O ₂ , CO e SO _x	Aterro industrial terceirizado
BAYERT Berfort Roxo RJ	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	Sólido, líquido, pastoso. Inclui difenilas	Lavadores ácido e alcalino, O ₂ , CO	Aterro industrial próprio
CETREL Camaçari BA	Sulzer	Rotativo	10.000	Líquidos organoclorados	Lavadores ácido e alcalino, O ₂ , CO ₂ e SO _x	Aterro industrial próprio
CETREL Camaçari BA	Andersen	Rotativo	4.500	Sólidos classe I	Coletor ciclone + Lavadores ácido e alcalino CO, O ₂ , CO ₂ , NO _x , SO ₂	Aterro industrial próprio
CIBA Taboão da Serra SP	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	Org. e inorgânicos. Exceto ascarel	Coletor ciclone + Lavadores ácido e alcalino NO _x , SO _x , O ₂ , CO, MP	Aterro industrial próprio
CINAL Mal. Deodoro AL.	CBC/Nittetu	Câmara horizontal	11.500	Sólido, líquido, pastoso. Inclui PCBs e organoclorados	Lavadores ácido e alcalino CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Aterro industrial próprio
CLARIANT Suzano SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Sólido e pastoso	Lavadores ácido e alcalino CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Aterro industrial terceirizado
ELLILLT Cosmópolis SP	Inter-Uhde	Rotativo	10.400	Sólido, líquido e pastoso	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂	Aterro industrial próprio
KOMPAX Fortaleza CE	Kompac	Câmara horizontal	10.950	Serviços de saúde e industriais	Lavadores ácido e alcalino CO ₂ , CO, O ₂ , SO ₂ , NO _x , HCl, Cl ₂	Aterro industrial
RHODIA Cubatão SP	Rhone-Poulanc	Rotativo	18.000	Sólido, líquido, pastoso. Inclui organoclorados	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x	Aterro industrial
SILCON Paulinea SP	Hoval	Leito Fixo pirolítico	3.600	Serviços de saúde	Lavadores ácido e alcalino O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x	Aterro industrial

Fonte: Adaptado de IPM (2018)

Outro dos avanços importantes foi a proposta desenvolvida pela Usina Verde, projeto de iniciativa privada, sendo parte da tecnologia desenvolvida pela Coppe/UFRJ. O projeto trabalha com a incineração de lixo urbano e é considerado uma tecnologia limpa, pois destrói termicamente os gases poluentes produzidos no processo, liberando na atmosfera, sem causar danos ambientais, apenas vapor de água e CO₂. Em funcionamento desde 2004, a usina, que fica na Ilha do Fundão, próxima ao Hospital Universitário, recebe diariamente 30 toneladas de resíduos sólidos, já pré-tratados, provenientes do aterro sanitário da COMLURB, no Caju.

Na unidade, os resíduos passíveis de reutilização ou de reciclagem são retirados; o restante é incinerado. Os gases ácidos resultantes da incineração do lixo são lavados com água alcalinizada. Ocorre então uma reação química que transforma essas substâncias em sais minerais e água. Além de ser ecologicamente correta, a usina apresenta também uma faceta econômica, pois cerca de 90% do peso do lixo é transformado em energia. Graças a uma caldeira de recuperação de calor instalada no forno do projeto, o calor da incineração dos gases de combustão é aproveitado para gerar energia elétrica, suficiente para abastecer 2300 residências, com um consumo médio de 200 kW/ mês. A figura 11 apresenta parte da estrutura do incinerador instalado pela Usina Verde.

Figura 11 – Vista geral dos equipamentos e incinerador da Usina Verde, RJ.



Fonte: Aliança Global (2006)

De maneira geral, existe uma grande quantidade de incineradores de porte pequeno, na sua maioria, instalados em áreas de hospitais, casas de saúde, entre outros, espalhados em diversos pontos do país. A maioria deles, é caracterizada como equipamentos simples, resultando numa capacidade de operação inferior a 100 kg/hora de resíduos. Muitos destes incineradores, atualmente, se encontram desativados ou com um sistema de funcionamento deficiente devido, principalmente, à falta de técnicos qualificados para operar os equipamentos e realizar os procedimentos de manutenção necessários.

3.6.2 Parâmetros de operação do processo de incineração

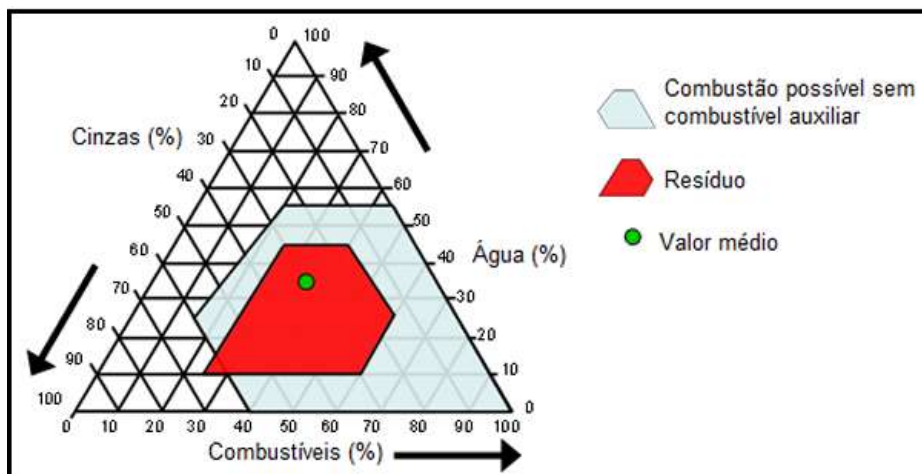
As principais características operacionais da tecnologia de incineração são a

pressão de trabalho, em torno de 50 bar, a elevada temperatura, superior a 450° C, e o rendimento em torno aos 25-30%. A eficiência do processo de combustão pode ser elevada a partir do controle dos seguintes três fatores: temperatura, turbulência e tempo de detenção.

A partir do processo inicial de introdução de resíduos no interior do incinerador, e em função do tipo de sistema utilizado, a massa em combustão é sujeita a diferentes faixas de temperatura de operação. Primeiramente, ao ser lançado no compartimento de acesso ao incinerador, na temperatura da ordem de 100°C, tem início o processo de perda de umidade pelos mecanismos de convecção e radiação. Ainda, prévio a ser atingida a câmara de combustão propriamente dita, sob pressão atmosférica e temperatura da ordem de 250°C, tem início o processo de volatilização. Na câmara de combustão, na faixa de operação de temperatura entre 600°C e 1300°C, para uma razão de ar e resíduo entre 1,5 e 2,0, temos o processo de oxidação completo.

Logo, entre estas fases, a velocidade de transição será função da composição e do poder calorífico dos resíduos em combustão. Na Figura 12 a seguir, temos a composição requerida para a combustão espontânea da massa de resíduos, a qual é baseada somente no potencial combustível que apresenta, sem a necessidade de uso de fonte externa adicional de energia, após atingida a temperatura de processo.

Figura 12 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos e seus respectivos produtos finais



Fonte: Adaptado de WtERT (2013).

Levando em consideração que toda parte orgânica não reciclável dos resíduos sólidos seja fonte combustível para incineração, poderá o poder calorífico da massa em combustão mostrar-se insuficiente, tendo um requerimento eventual de combustíveis auxiliares, tais como GLP, gás natural ou óleo diesel. Em geral, o requerimento deste auxílio se dá no momento da partida do incinerador (Henriques, 2004).

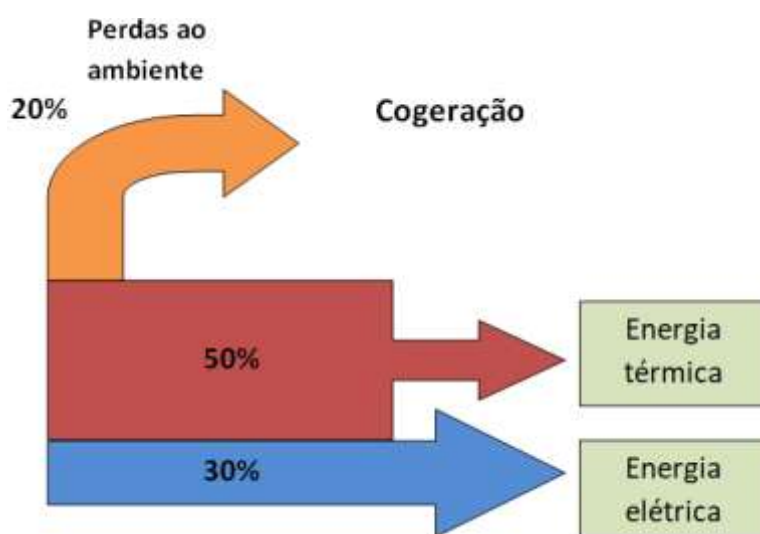
Alguns outros materiais e parâmetros tanto de projeto quanto de construção do incinerador são pontos importantes para minimizar a quantidade de combustível auxiliar requerido, como: queimadores, sopradores, material refratário, isolante térmico, interface refratário-aço, e a sincronia entre as câmaras.

3.6.3 Tecnologia *Waste-to-Energy* para a incineração de resíduos sólidos urbanos

Com a diferença de um sistema de incineração convencional, a tecnologia *Waste-to-Energy* apresenta como característica diferencial a produção simultânea de energia, tanto térmica quanto elétrica, através da recuperação do calor presente nos gases produzidos. A esta tecnologia pode ser dada a denominação de “cogeração”, pois parte da sua energia residual pode ser utilizada como energia térmica e outra parte pode ser convertida em energia elétrica (Moratorio *et al.*, 2012).

A tecnologia *Waste-to-Energy* apresenta, como mencionado, a produção simultânea de diferentes formas de energia, que são detalhadas na Figura 13.

Figura 13 – Proporções de cogeração de energia produzida no sistema *Waste-to-Energy*

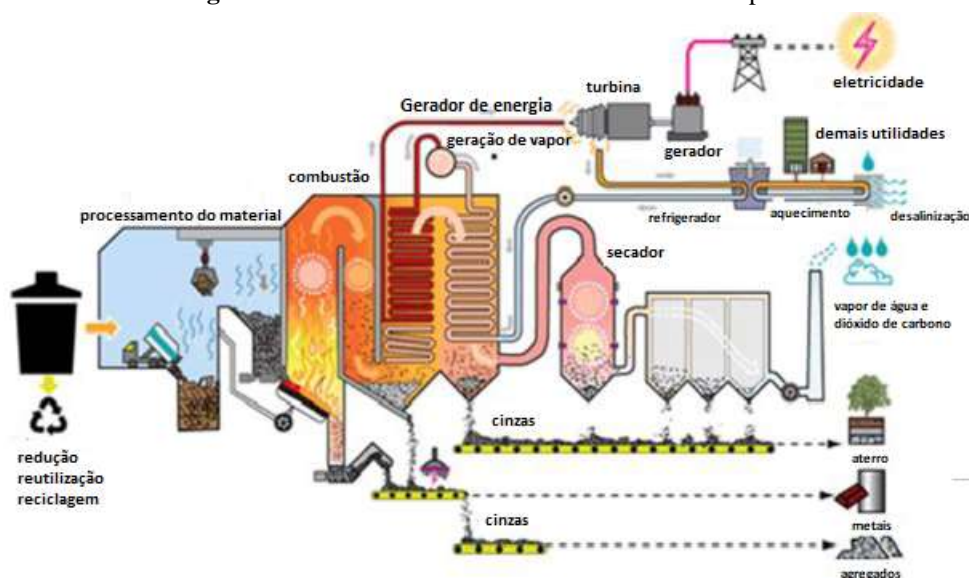


Fonte: Adaptado de Moratório *et al.* (2012).

Nessa tecnologia, 50% do total da energia produzida pode ser convertida em energia térmica, 30% em elétrica e os 20% restantes são perdidos para o meio ambiente.

Outra vantagem da tecnologia WTE é que as usinas podem ser instaladas próximas aos centros de produção dos resíduos, reduzindo custos sociais e financeiros do transporte. Na Figura 14 a seguir são detalhadas as partes e componentes principais de um incinerador WTE.

Figura 14 – Incinerador de Resíduos Sólidos Municipais



Fonte: Adaptado de Energy Information Administration (2016).

O incinerador é composto pela câmara de combustão, na qual os resíduos são inseridos a uma taxa de alimentação pré-definida e onde ocorre o processo de queima controlada. 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 (FEAM, 2012). Também há uma câmara de pós combustão onde é realizada a queima de substâncias orgânicas contidas nos gases resultantes da câmara de combustão propriamente (BRASIL, 2012). Tais fornos apresentam diversas configurações, dentre elas a que faz uso de grelha, na maioria das vezes adotada para os RS no estado bruto.

A capacidade de geração de uma planta WTE não está apenas associada à sua eficiência na transformação dos resíduos em calor, mas também ao poder calorífico do material que será utilizado como combustível. Neste sentido, a qualidade do resíduo está associada a fatores como a presença de umidade excessiva, a qual poderá exigir a necessidade de um processo de secagem prévio à sua queima nos incineradores. Caso o material seja considerado adequado o suficiente, a combustão poderá ser autossustentável, eliminando a necessidade da adição de outros combustíveis ao processo. Em caso necessário, a utilização do gás natural, por exemplo, como combustível auxiliar, poderá amenizar os custos operacionais, tornando viável a utilização deste processo.

3.6.4 Tipos de incineradores

Os incineradores de resíduos sólidos desempenham um papel crucial na gestão de resíduos, proporcionando uma alternativa eficaz para a eliminação de materiais indesejados.

Esses sistemas são projetados para converter resíduos sólidos em energia térmica por meio da combustão controlada. Existem diversos tipos de incineradores, cada um com características específicas para atender às necessidades variadas de diferentes locais e tipos de resíduos. Os quatro mais comuns projetos de incineradores são injeção líquida, forno rotativo, forno de grelha (leito fixo) e leito fluidizado, sendo estes últimos os mais utilizados nas aplicações cotidianas.

Num incinerador existem subsistemas que devem ser incluídos no sistema de incineração de resíduos perigosos, sendo estes: (1) preparação e abastecimento de resíduos, (2) câmara de combustão, (3) controle da poluição de ar, (4) controle de efluente líquido e (5) manuseio de resíduos/cinzas. A adequada seleção e combinação destes depende diretamente das propriedades físicas e químicas do resíduo a ser incinerado (EPA, 2018).

3.6.4.1 *Incinerador de grelha ou de leito fixo*

Os incineradores de leito fixo representam uma categoria específica de tecnologia para a incineração de resíduos sólidos, oferecendo uma abordagem eficiente e controlada para a eliminação de materiais indesejados. Esses sistemas são projetados com base no princípio do leito fixo, proporcionando um ambiente de combustão que otimiza a eficiência e reduz as emissões de poluentes.

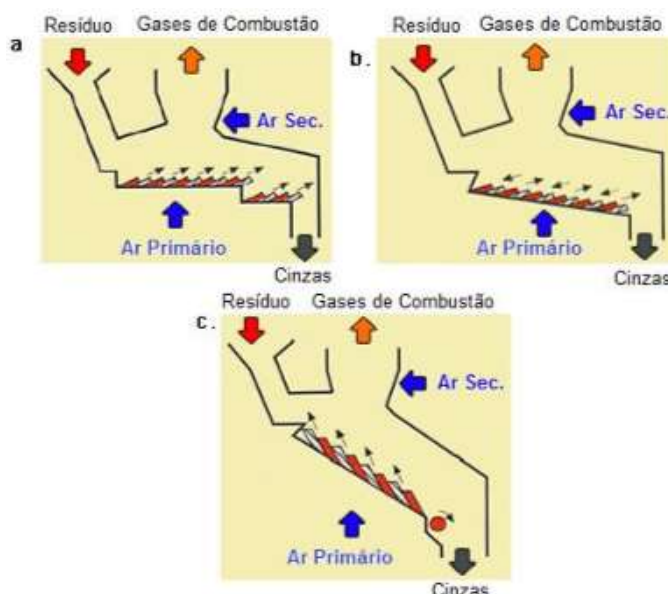
O seu funcionamento se dá por meio da incineração de resíduos sólidos em um leito estático de material inerte, geralmente composto por tijolos refratários. Os resíduos são colocados sobre esse leito e, em seguida, incinerados a temperaturas elevadas. O ar ou o oxigênio é introduzido na câmara de combustão para sustentar a queima dos resíduos.

Essa abordagem oferece vantagens significativas, como uma queima mais completa e controlada dos resíduos. A inércia térmica do leito fixo ajuda a manter condições estáveis de combustão, permitindo que os resíduos sejam queimados de maneira eficiente, minimizando a formação de subprodutos não desejados (Yin *et al.*, 2008)

O sistema de grelha pode ser do tipo inclinado e fixo, favorecendo a sucessiva exposição de resíduos ao ambiente térmico, mediante o deslizamento gravitacional dos mesmos, desde o ponto de entrada na câmara de combustão, até o compartimento de recolhimento das cinzas (ash pit). Já os sistemas móveis contam com uma estrutura mecânica capaz de promover o transporte de resíduos, também desde o ponto de entrada na câmara de combustão, até o compartimento de recolhimento das cinzas. Neste contexto, destacam-se os sistemas do tipo grelha móvel (*traveling grate*, (a)), de sentido único de movimentação dos dispositivos mecânicos; o sistema *conter direction push over grate* (b), que promove a

movimentação alternada e em 2 sentidos; o sistema *reciprocating grate* (c), cuja movimentação dos dispositivos mecânicos ocorre em sentido contrário à movimentação da massa de resíduos em combustão, propiciando eficiente grau de mistura e acumulação de cinzas. A tecnologia conta ainda com os sistemas do tipo grelha vibratória e do tipo tambor rotativo (Bilitewski *et al.*, 1997).

Figura 15 – Modelos de sistemas de grelhas



Fonte: Adaptado de Bilitewski et al (2023)

O sistema de grelha é capaz de processar resíduos combustíveis de tamanho e forma heterogênea, contendo maior ou menor teor de umidade. Considerando que esta configuração não promove uma mistura intensa do material em combustão, o processo pode apresentar transientes de instabilidade, e que podem ser compensados, mediante controle do sistema de ar secundário.

3.6.4.2 Incinerador de leito fluidizado

Os incineradores de leito fluidizado destacam-se como uma tecnologia avançada e eficiente na gestão de resíduos sólidos. Baseando-se no conceito de leito fluidizado, esse tipo de incinerador oferece uma abordagem dinâmica que proporciona uma combustão eficaz e a redução significativa de emissões poluentes.

Em reatores de leito fluidizado, material sólido granulado e inerte, tal como areia, calcário ou alumina, é mantido em suspensão no ambiente de combustão, sob condições turbulentas, por meio da injeção de jato de ar ascendente. A eficiente transferência de calor para a massa de resíduos em combustão é garantida pelo calor emitido a partir do próprio leito aquecido de material sólido granulado. A turbulência que a injeção de ar promove no ambiente

impõe condições ideais de mistura no interior da câmara de combustão.

Incineradores de leito fluidizado que operam sob excesso de ar compreendido entre 30 e 40%, e sob temperatura entre 750°C e 850°C, mostram-se energeticamente mais eficientes que os sistemas de grelhas (Bontoux, 1999).

Os incineradores de leito fluidizado podem ser utilizados para líquidos, lamas ou materiais sólidos incluindo o solo. Por permitir uma boa distribuição do resíduo dentro do leito e remover os sólidos residuais originados, os incineradores de leito fluidizado oferecem alta eficiência de transferência de calor, alta turbulência e temperatura uniforme ao longo do leito. A dimensão da câmara de combustão, as condições de operação (temperatura de combustão, tempo de residência, eficiência da mistura do resíduo/combustível/ar) e a natureza do sistema de controle da poluição de ar e cinzas/resíduos manuseados são determinadas pelas propriedades físicas, químicas e termodinâmicas dos resíduos. Entre as propriedades químicas citam-se a composição elementar e entre as propriedades físicas o teor de umidade. Estas são necessárias para a determinação da quantidade de ar estequiometricamente necessário para combustão e do fluxo de gás requerido. É importante entender que as variações das temperaturas típicas de operação, do tempo de residência do gás e sólido e das taxas de excesso de ar para cada incinerador podem diminuir a eficiência de remoção e destruição do resíduo (Worrel, 2012).

São três os tipos principais de incineradores de leito fluidizado: bubbling, rotating e circulating. No tipo bubbling, o leito fluidizado permanece em estado praticamente estacionário no fundo da câmara de combustão. Já no tipo rotating, a distribuição não uniforme do ar primário promove o estabelecimento de zonas de maior e menor turbulência, impondo melhores condições de mistura. E no tipo circulating, velocidades mais elevadas e da ordem de 3,0 a 9,0 m/s impõem a contínua expulsão das partículas para o exterior da câmara de combustão, de onde, separadas por um ciclone externo, retornam novamente ao fundo da câmara de combustão (Van Caneghem *et al.*, 2012).

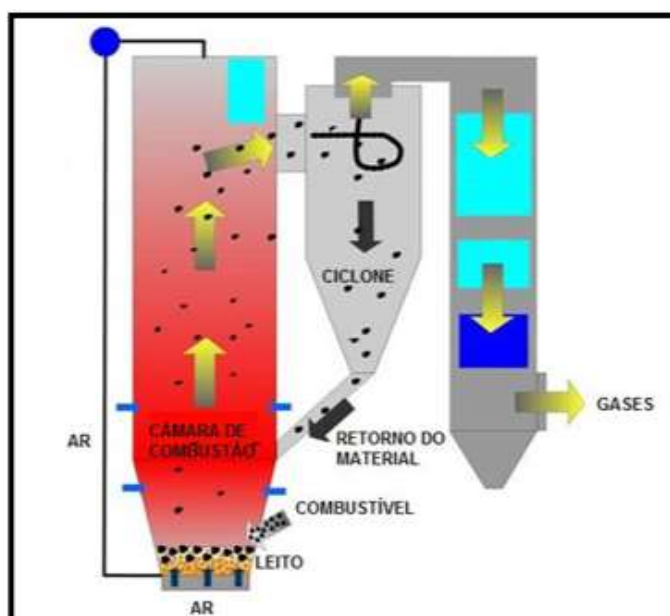
As vantagens desta tecnologia são principalmente:

- Eficiência térmica: a natureza dinâmica do leito fluidizado promove uma eficiente transferência de calor, resultando em altas taxas de eficiência térmica;
- Redução de emissões: a combustão em leito fluidizado contribui para a redução de emissões de poluentes, incluindo óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre;
- Versatilidade: a capacidade de ajustar as condições operacionais torna os incineradores de leito fluidizado versáteis para lidar com diferentes tipos de resíduos.

Por outro lado, as desvantagens do leito fluidizado são:

- proporciona atrito entre as partículas e as paredes do equipamento;
- os custos de operação são relativamente altos, principalmente com a energia;
- em caso de altas temperaturas, havendo um pequeno descontrole na fluidização, pode acarretar a formação de aglomerados que crescem e obstruem completamente partes do equipamento ou o próprio distribuidor, interrompendo a distribuição;
- não são recomendáveis em processos onde as partículas não permitem uma fluidização adequada, e com partículas frágeis porque se pulverizam. Em caso de operações catalíticas à alta temperatura, a aglomeração e a sintetização de partículas finas podem requerer a diminuição da temperatura, reduzindo assim a performance do sistema (Seader *et al.*, 2011).

Figura 16 – Incinerador de leito fluidizado do tipo *circulating*



Fonte: Adaptado de Van Caneghem *et al.* (2012).

3.6.5 Cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos

As cinzas são produtos da incineração e constituem-se da porção inorgânica e da matéria não-combustível presente no lixo. Há dois tipos de cinzas: as de fundo que são resultantes da combustão e consistem nos materiais não combustíveis (denominadas por alguns autores como escória) e as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle das emissões gasosas, denominadas de cinzas volantes. Em geral, as cinzas de fundo correspondem de 75% a 90% de toda cinza gerada, dependendo do tipo das instalações e do tipo de resíduo incinerado (Caixeta, 2005).

Uma vez que a composição do lixo municipal varia no tempo e de país para país,

devido às diferenças culturais e processos de reciclagem de cada lugar, a composição das cinzas também irão variar. Geralmente, a caracterização química e física das cinzas irão depender da composição do lixo bruto, condições operacionais, tipo de incinerador e sistema de controle de poluição de ar (He *et al.*, 2004).

Quanto ao aproveitamento de materiais residuais como a cinza, isto constitui atualmente uma área de estudo em expansão, principalmente devido a questões de sustentabilidade e racionalização de recursos.

Entre algumas das técnicas de aproveitamento, tanto das cinzas de resíduos sólidos como outros resíduos industriais, é a aplicação destes como estabilização de solos, contribuindo com a melhoria de algum material já existente.

Sobre a aplicabilidade das cinzas de resíduos sólidos para estabilização de solos, a temática ainda se encontra em fase de pesquisa, e esta é menos utilizada na prática quando comparadas, por exemplo, às cinzas provenientes do carvão, devido ao menor número de usinas de incineração de resíduos. No entanto, o comportamento relatado sobre seus efeitos e mecanismos de estabilização é comparável aos da cinza de carvão, desde que o resíduo sólido seja composto principalmente por matéria orgânica (Vizcarra, 2010).

Conforme Mangialarde (2001), o reuso do resíduo como agregado reciclado para a produção de concreto pode ser muito interessante, pois reduz o consumo de agregados naturais. Por outra parte, suas propriedades químicas e de lixiviação requerem uma caracterização rigorosa, para evitar uma potencialidade de impactos negativos ao meio ambiente.

Com base nas características das cinzas, Ferreira *et al.* (2003) apresentam nove potenciais aplicações para o resíduo, agrupando-as em quatro categorias principais. A tabela 3 apresenta os possíveis usos.

Tabela 3 – Usos potenciais de cinza proveniente de incineração de resíduos sólidos.

Categoria	Aplicação
Materiais de construção	Produção de cimento
	Concreto
	Cerâmicas
	Vidro e cerâmicas de vidro
Geotécnica	Pavimentação
	Aterros
Agricultura	Condicionador de solo

Diversos	Absorvente
	Condicionamento de lodo

Fonte: Ferreira *et al* (2003)

Para fins de obras geotécnicas como a pavimentação, a cinza proveniente do processo de incineração de resíduos sólidos pode ser aplicada como material substituto de areia e/ou cimento para bases e sub-bases estabilizadas com cimento. Questões ambientais relativas a esta aplicação são a contaminação do solo subjacente e águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da camada de base (Ferreira, 2003).

3.6.6 Aspectos ambientais na incineração de resíduos

As etapas que compõem o processo de incineração têm impactos diferentes no resultado final. Estudo prévio (Henriques, 2004) definiu os maiores impactos ambientais produzidos pela incineração, conforme detalhados a seguir:

- Construção da planta (barulho, emissões, acidentes, efeitos de degradação do ecossistema local);
- Coleta e transporte dos RS (barulho, transporte, emissão, acidentes, odores);
- Impactos secundários do incinerador (barulho, intrusão visual, odor, etc.);
- Transporte e disposição das cinzas de resíduos (incluindo tecnologia do abatimento de resíduo) e;
- Combustão de resíduos (emissões atmosféricas, incluindo emissões de traços de dioxinas e metais pesados).

Dentre os impactos mencionados, o mais importante decorrente do processo de incineração corresponde à geração de emissões do processo de combustão dos RS (Henriques, 2004). Para a maioria dos combustíveis sólidos utilizados, incluindo os RS, os poluentes atmosféricos gerados são o dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido sulfúrico (SO_2). 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). Cabe ressaltar, neste sentido, que os níveis de emissões gerados são geralmente maiores (por kWh produzidos) em relação à maior parte das fontes fósseis.

As características das emissões e poluentes resultantes de uma planta de incineração podem variar de acordo com a tecnologia e sistemas adotados. Muitos deles podem ser reduzidos no processo de combustão a partir de um cálculo exato em termos de composição de resíduos, que vai depender por sua vez da região selecionada e também das ações e políticas de

gestão implementadas, como o caso da coleta seletiva, por exemplo.

Um aspecto ambiental importante com relação ao processo de incineração corresponde à avaliação da formação de dioxinas e furanos, já mencionadas. As temperaturas elevadas permitem a quebra das ligações químicas, atomizando macromoléculas e reduzindo ao mínimo a possibilidade de formação destes poluentes. Desta forma, como mencionado, o tipo de tecnologia adotado irá incidir notavelmente nos resultados obtidos no processo. Algumas técnicas como o uso de carvão ativado em leitos pós-combustão adsorvem eficientemente qualquer resquício de dioxinas e furanos, como também os metais voláteis. Dependendo da composição dos resíduos, nem sempre é possível manter a operação nesta faixa de temperatura, sendo necessário obrigatoriamente o uso de combustível auxiliar para realizar o processo de queima.

3.6.7 Tratamento de emissões atmosféricas das usinas que fazem uso da tecnologia

Waste-to-Energy

O tratamento de gases faz uso de processos físicos e químicos, tendo uma grande variedade de opções de conformação e equipamentos. O primeiro processo consiste em resfriar os gases de saída da câmara secundária, os quais se encontram na faixa de temperatura entre 1000°C e 1200°C, através das torres de resfriamento. Nessa etapa, além do resfriamento dos gases de combustão, vapor de água é gerado, podendo ser utilizado para a geração de energia elétrica mediante o processo de cogeração, assim como sua utilização em sistemas de aquecimento ou de refrigeração (Henriques, 2004).

Em seguida os gases são neutralizados com a injeção de hidróxido de cálcio, altamente eficiente na neutralização e captura de SO_x e HCl. Os gases que já foram resfriados e neutralizados, passam por um sistema de filtros (filtros-manga) que retiram o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio) de dimensão até 0,3 micrômetros. Em algumas conformações são utilizados outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores venturi, ciclones, etc. Por último, os gases passam por um leito adsorvente, à base de carvão ativado (leito fixo ou leito fluidizado), de área superficial elevada, a qual possui uma tripla ação:

- Retenção de óxidos nitrosos: evitam-se picos de geração de NO_x, eventualmente formados por distúrbios na câmara secundária, inibindo que sejam emitidos abruptamente para a atmosfera;
- Retenção de organoclorados: ação preventiva quanto à emissão de dioxinas por algum problema na câmara secundária;

- Retenção de metais voláteis: o material adsorvente atua como uma “peneira molecular” retendo metais voláteis. Tanto por injeção, como através de um leito fixo, o material adsorvente possui comprovadamente altíssima eficiência na retenção de materiais.

Estudos apontam que com a incineração controlada de 500 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos é possível abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 16 MW, o que representa um potencial energético de cerca de 0,7 MWh/t (Oliveira, 2004).

É importante considerar também que, as emissões de metano geradas pela decomposição anaeróbia dos resíduos nos lixões são mais prejudiciais que as emissões injetadas pelas usinas WTEs, o que favorece a redução do aquecimento global (Baird, 2011).

Entretanto existe uma ampla faixa de poluentes oriundos de um processo de combustão de RS, segundo Daskalopoulos *et al.* (1997), que requerem mais que uma tecnologia para um controle rigoroso das emissões. A Tabela 4 apresenta de maneira generalizada as tecnologias mais utilizadas para cada tipo de poluente.

Tabela 4 – Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de RS.

Poluente	Opções tecnológicas de controle
Ácido clorídrico (HCl)	Centrifugação; precipitação eletrostática; filtração ou lavagem lavador úmido
Ácido fluorídrico (HF)	Lavagem através do lavador úmido
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Lavagem lavador semi-seco
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Redução catalítica ou não catalítica
Mercúrio (Hg), cádmio (Cd), chumbo (Pb)	Igual ao material particulado
Outros metais pesados	Igual ao material particulado
Bifenóis policlorados	Lavagem lavador semi-seco ou seco
Dioxinas e furanos	Igual ao material particulado ou aos bifenóis policlorados

Fonte: Daskalopoulos *et al.* (1997)

3.6.8 Legislação ambiental aplicada ao uso de usinas *Waste-to-Energy* no Brasil.

Os limites máximos para a concentração de determinados componentes atmosféricos são estabelecidos pelas normativas ambientais e os padrões de qualidade com a finalidade de preservar a qualidade do ar, mantendo as emissões dentro de níveis que não prejudiquem a saúde e o meio ambiente em geral. Os padrões de qualidade do ar representam o nível no qual a concentração do poluente deve ser mantida ou reduzida, para evitar efeitos

indesejados, não sendo baseado na tecnologia adotada e sim nos efeitos da poluição do ar.

No Brasil, existem atualmente algumas leis e regulamentações que orientam e regulam os sistemas de operação e controle dos diversos processos produtivos, sendo estes:

- O Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar, o qual foi instituído pela Resolução CONAMA n° 005/89 (CONAMA, 1989). Este programa tem por objetivo definir os limites de emissão de poluentes com a finalidade de controlar, preservar e recuperar a qualidade do ar em todo o território. Em conformidade com este programa, a Resolução CONAMA n° 003/90 (CONAMA, 1990) fixa os padrões nacionais de qualidade do ar.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 1265: Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos: Padrões de Desempenho, 1989;
- Resolução CONAMA n° 316, de 29 de outubro de 2002, o qual dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, destacando a obrigatoriedade do sistema em possuir unidades de recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de partículas e gases, tratamento de efluentes líquidos, cinzas e escórias.
- Resolução SEMA n° 043/2008, de 16 de julho de 2008, a qual dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e critérios para empreendimentos de incineração de resíduos sólidos e dá outras providências;
- Resolução CONAMA n° 382, de 26 de dezembro de 2006, o qual estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas;
- Lei n° 12.187/2009: Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), o qual institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências;
- Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010, a qual estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos e incentivando a utilização de tecnologias visando a recuperação energética, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental, com a implantação do programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos, aprovado pelo órgão ambiental;
- Resolução CONAMA n° 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 SEMA n° 016/2014, de 15 de abril de 2014, a qual define os critérios para o Controle da qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar da população e melhoria da qualidade de vida;
- Resolução CONAMA n° 491, de 19 de novembro de 2018, que estabelece os padrões de qualidade do ar;
- Portaria Interministerial n° 274/2019, que disciplina a recuperação energética dos resíduos, buscando nortear o artigo 9º, § 1º, da Lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Todas estas leis, resoluções e portarias foram elaboradas visando a orientação quanto aos procedimentos e padrões necessários a serem considerados nos projetos e desenhos técnicos, visando a incineração de resíduos sólidos como alternativa de destinação final

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a proposta da incineração como rota tecnológica para aproveitamento energético dos resíduos sólidos gerados no município de Foz do Iguaçu, Estado do Paraná, Brasil.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Conhecer o panorama da gestão dos resíduos sólidos no Brasil e no mundo;
- b) Realizar o levantamento de dados bibliográficos qualitativos e quantitativos dos resíduos sólidos gerados no município de Foz do Iguaçu, Paraná;
- c) Apresentar as rotas tecnológicas existentes para a gestão e aproveitamento energético dos resíduos sólidos, destacando o funcionamento do sistema *Waste-to-Energy*;
- d) Estimar o potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos gerados pelo município de Foz do Iguaçu;
- e) Definir a viabilidade socioambiental e econômica para a implementação da tecnologia de incineração como rota tecnológica para aproveitamento de resíduos sólidos.

5 METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS

A pesquisa desenvolvida foi realizada inicialmente a partir do levantamento de dados e informações técnicas referentes aos aspectos da gestão, logística e manejo dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, com foco específico no município de Foz do Iguaçu. Os principais parâmetros analisados foram o volume de geração dos resíduos e a sua classificação, conforme o tipo e quantidade gerados. Nesta pesquisa, foi realizado o recorte temporal de dados para análise e elaboração do sistema proposto, considerando o volume de resíduos sólidos gerados no município no período de 2014 a 2022, levando em conta a confiabilidade de dados e as fontes de informação disponíveis nos arquivos consultados. Os principais materiais analisados foram obtidos a partir de publicações e documentos oficiais de órgãos e instituições públicas, assim como empresas particulares responsáveis pela gestão (coleta e destinação final) dos resíduos sólidos na cidade de Foz do Iguaçu.

Além disso, de maneira a identificar as oportunidades existentes em termos de volume de geração de resíduos no município, foi realizada uma estimativa de verificação, mediante a projeção da geração de resíduos sólidos nos próximos 20 anos, considerando o ano base de estudo sendo o ano de 2022, com uma escala de projeção até o ano 2042. Para realizar a simulação, foi adotado o método de Suavização Exponencial (Algoritmo ETS), com um intervalo de confiança de 95%.

5.2 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA E PROPOSTA DE APROVEITAMENTO DE RSU

A partir da quantidade de volume gerado de RS no município de Foz do Iguaçu e considerando o valor médio do PCI para o resíduo municipal, foi definida a proposta da metodologia de tratamento mediante o uso da tecnologia *Waste-to-energy*. Essa tecnologia permite a redução do volume de resíduos e a cogeração energética, mediante a incineração controlada em câmaras de combustão, a partir de incineradores industriais, destinados aos materiais sólidos, orgânicos e inorgânicos, entre outros.

5.3 PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Existem duas maneiras de obter os valores de PCI, sendo a primeira delas a partir de fórmulas empíricas, com base no percentual de composição de elementos químicos. O segundo método para obtenção do valor de PCI, corresponde ao cálculo com base nas frações

de cada tipo de material que compõe o RS e o valor de poder calorífico associado a cada categoria (Guatta, 2021), sendo este o método adotado para esta pesquisa. A expressão referente à obtenção do PCI com base na composição das frações do material é dada conforme a seguir:

$$\text{PCI} = \text{PCI}_{\text{plástico}} \times \% \text{ plástico} + \text{PCI}_{\text{papel/papelão}} \times \% \text{ papel/papelão} + \text{PCI}_{\text{mat.orgânica}} \times \% \text{ mat.orgânica} + \text{PCI}_{\text{têxteis}} \times \% \text{ têxteis} + \text{PCI}_{\text{rejeitos}} \times \% \text{ rejeitos} \quad (1)$$

PCI = Poder calorífico inferior [kcal/kg];

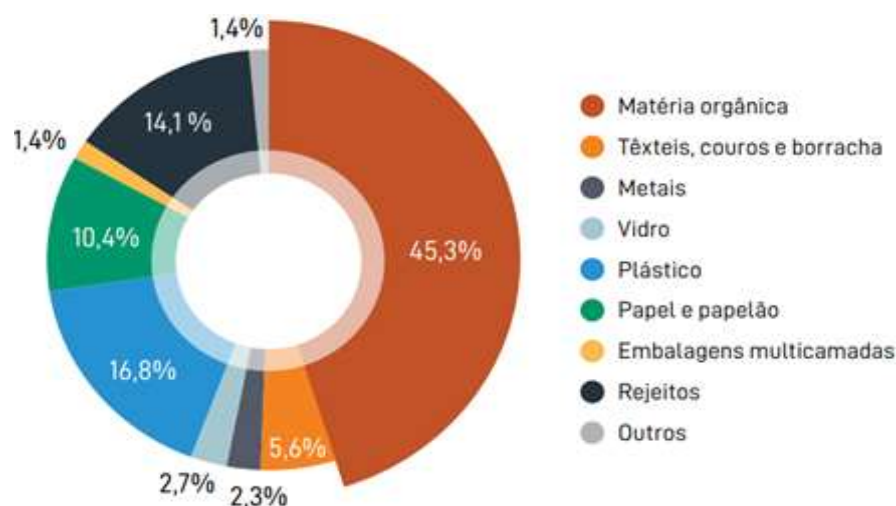
% = Percentual de cada material que compõem a amostra;

Os dados referentes à composição gravimétrica adotados neste trabalho não são específicos para o município de Foz do Iguaçu, pois de acordo com o levantamento de dados feito junto com a empresa que administra a logística de coleta e disposição final de RS no município, a mesma não conta com esta informação.

5.4 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Conforme mencionado, a composição média dos RS foi adotada para o valor médio no Brasil, a partir dos dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), e é apresentada na Figura 17:

Figura 17: Composição gravimétrica média dos RS no Brasil



Fonte: ABRELPE, 2020

Os valores de PCI referentes aos componentes de cada material presente no RS foram definidos conforme detalhados por Guatta (2021), e serão apresentados na Tabela 5 na

seção de resultados e discussão.

5.5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

O dimensionamento propriamente da planta de incineração foi realizado seguindo uma sequência sucessiva de passos, estipulando a obtenção da capacidade de processamento de RS da planta e a energia elétrica a ser obtida como ganho energético do processo de incineração. Para o cálculo da capacidade de processamento e queima de RS (Q_t), foi considerada a quantidade total de resíduos disponíveis no município em toneladas/ano (Q) e o tempo de funcionamento hipotético da planta de incineração dimensionada (F), sendo definido o valor de 4320 horas anuais (12 horas diárias). Logo, a capacidade de processamento e incineração pode ser dado pela equação a seguir:

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = Q \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / F \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

A partir da capacidade de processamento obtida na equação (2), e o valor do PCI previamente calculado, será realizado o cálculo da Potência térmica, em megawatt térmico, resultante do processo de incineração de resíduos na planta pela equação a seguir:

$$P_t \text{ (MWt)} = Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times \text{PCI (kJ.kg}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Conforme Moratorio *et. al* (2012), as proporções de cogeração de energia produzidas no sistema “*Waste-to-energy*” mediante o processo de incineração, correspondem a 50% de energia térmica, 30% na forma de energia elétrica e os 20% restantes representam as perdas ao ambiente externo. Desta forma, o percentual de potência elétrica do gerador foi dado por:

$$P_e \text{ (MWe)} = P_t \text{ (MWt)} \times 30\% \quad (4)$$

Finalmente, para a obtenção do valor de potência elétrica mensal disponibilizada na rede, é realizada a consideração do tempo de funcionamento da planta de incineração durante o total de 360 horas no mês, e considerando o valor da potência elétrica do gerador obtido na etapa anterior, temos o cálculo dado pela equação a seguir:

$$P_e \text{ mensal (kWe/mês)} = P_e \text{ (kWe)} \times \text{tempo de funcionamento da usina (h)} \quad (5)$$

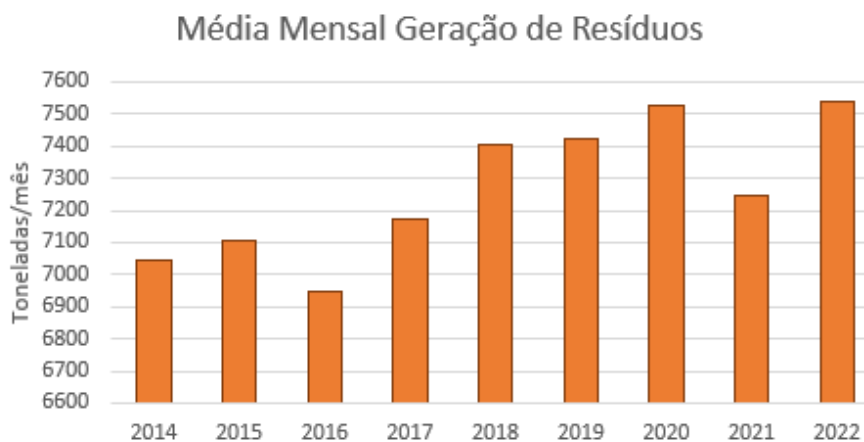
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo realizado verificou o potencial energético associado à gestão dos resíduos sólidos gerados no município de Foz do Iguaçu, mediante a implantação do sistema *Waste-to-energy* como alternativa para o tratamento e disposição final.

6.1 CÁLCULO DO VOLUME DE GERAÇÃO MÉDIA MENSAL DE RESÍDUOS DESTINADOS AO ATERRO

Em primeiro lugar, foi realizada a quantificação do volume mensal médio de resíduos sólidos gerados no município, os quais são encaminhados ao aterro sanitário, considerando os dados disponibilizados pela empresa Vital Engenharia Ambiental no período compreendido entre o ano 2014 a 2022. Na Figura 18 a continuação são observadas algumas características importantes, como o aumento gradual em termos de geração de resíduos ao longo do tempo, com algumas flutuações nos anos 2016 e 2021.

Figura 18: Geração média mensal de RS em Foz do Iguaçu (2014-2022).



Fonte: Elaborado pelo autor com base no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), Foz do Iguaçu, 2023.

Entre os anos 2014 e 2022, foi gerada uma média anual de 87.205,44 toneladas de RSU, resultando em 7.267,12 toneladas mensais, equivalentes a 269 toneladas diários no município. De acordo com dados levantados pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS/PR, 2017), a faixa de população no município apresenta *índice per capita* de geração de resíduos equivalente a 1,01 kg/hab.dia. Considerando o número de habitantes de Foz do Iguaçu, com 285.415 pessoas, de acordo com o Censo do IBGE de 2022, o valor obtido para a média diária de resíduos gerados encontra-se próxima do valor estimado pelo plano.

Neste ponto, é importante destacar que Foz do Iguaçu, pela sua localização geográfica na tríplice fronteira e os atrativos de natureza, representa um dos pontos turísticos mais procurados no Brasil. A contribuição em termos de geração de resíduos sólidos pelo número de turistas que ingressam ao município deve ser considerada, pois eles participam diretamente na dinâmica e volume total de resíduos gerados. Conforme dados da Divisão de Estatísticas e Estudos Turísticos da Secretaria Municipal de Turismo, dependente da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu, nos últimos quatro anos, teve-se uma média de 4703 pessoas em situação de turista diariamente, o que representa 1,65% do total da população do município. Cabe ressaltar que este é um valor estimado, pois nos últimos anos, aconteceram situações atípicas em termos de visitação, principalmente envolvendo a pandemia COVID-19. Assim, a população média, incluindo os moradores e turistas será dado por: $285.425 + 4703 = 290.128$ pessoas.

Logo, considerando a quantidade média de resíduos gerados por pessoa diariamente, em torno aos 1,043 kg (ABRELPE, 2023), temos o volume total de resíduos gerados:

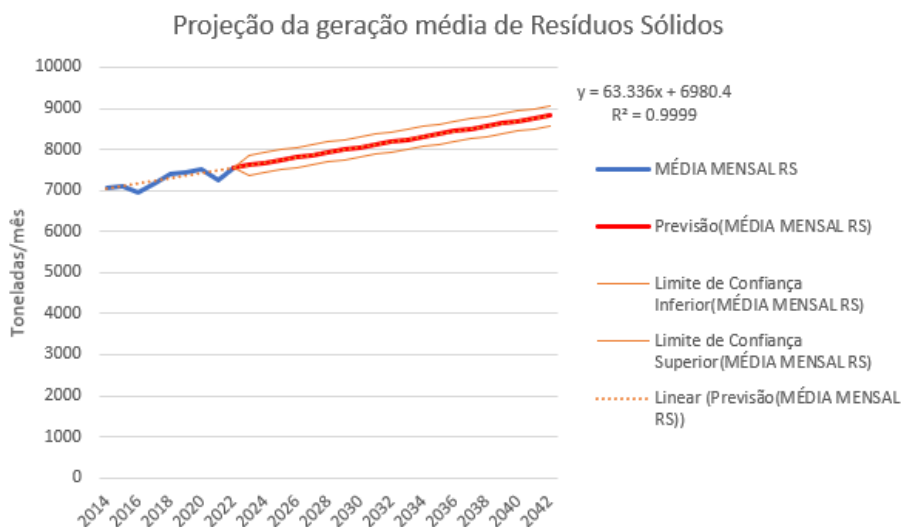
Volume total de resíduos (VTR): $1,043 \text{ kg/dia} * 290.128 = 302.603,50 \text{ kg/dia}$.

Ou seja, em média temos um volume de geração diária de resíduos sólidos no município de 302,60 toneladas. Realizando a estimativa mensal, temos o valor aproximado de 9078 toneladas, equivalentes a 108.936 toneladas anuais de resíduos gerados.

6.2 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FUTURA DE RS NO MUNICÍPIO

A partir do histórico de dados, foi realizada uma projeção no tempo de maneira a obter uma estimativa da geração de resíduos sólidos esperada nos próximos anos no município. Este dado é de muita importância, pois permite obter uma perspectiva em termos numéricos do valor em toneladas *per capita*, que será utilizado para definir planos e propostas a curto, médio e longo prazo, para a gestão eficiente e estratégica nas etapas de coleta e disposição final de resíduos.

Além disso, a representação gráfica com base na equação de ajuste da reta permite definir os limites de confiança superior e inferior para modelagens futuras. Esta análise permitirá realizar uma projeção no tempo com base em dados históricos da estimativa de resíduos sólidos esperada, em termos de volume, nos próximos anos para o município. A Figura 19 ilustra esta estimativa.

Figura 19: Previsão de estimativa de geração média de RS no município (2022-2042).

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Plano Municipal (2018)

Como é possível observar, é esperado um crescimento gradual e constante na geração de resíduos sólidos nos próximos anos, confirmando assim a disponibilidade de volume de resíduos sólidos necessários para o aproveitamento energético desejado. Esta verificação permite definir a viabilidade quanto a investimentos para a implantação futura de plantas e usinas de processamento e tratamento de resíduos sólidos.

6.3 CÁLCULO DO PCI ASSOCIADO AO RS MUNICIPAL

Em relação à composição das frações de material presente no RS e os respectivos valores de PCI associados, estes foram definidos conforme dados da literatura (Guatta, 2021), detalhados conforme a Tabela 5:

Tabela 5: Quantificação do poder calorífico inferior dos materiais no RSU (média nacional)

Composição Gravimétrica	Fração (%)	PCI (kcal/kg)	PCI proporcional (kcal/kg)
Papel/papelão	10,4	2.686	279
Plástico	16,8	7.050	1184
Têxteis	5,6	3.550	199
Rejeitos	14,1	1.111	157
Orgânico	45,3	795	360
Total			2179

Fonte: Guatta, A. (2021)

Conforme a equação (1), foi obtido um valor de PCI de 2179 kcal/kg (9117 kJ/kg),

com base na composição gravimétrica das frações presentes no RS. Este parâmetro será usado para o dimensionamento do potencial energético associado aos resíduos e a sua capacidade de aproveitamento nas usinas de geração de energia WTE.

6.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA WTE E GERAÇÃO DE ENERGIA

Para o aproveitamento energético proposto, utilizando a tecnologia *Waste-to-energy*, é considerada a implementação de um sistema de cogeração de energia, a partir do processo de incineração dos RS com secagem prévia. O calor gerado na incineração aquece a água em um aquecedor (*boiler*), produzindo vapor. Esse vapor produzido é utilizado para a obtenção de energia elétrica, mediante o uso de um sistema turbina-gerador. A energia elétrica produzida pode, então, ser acoplada à rede de transmissão e distribuição local. Entretanto, é importante destacar que, o objetivo principal da tecnologia de incineração WTE, quando utilizada para tratamento de RS, é a diminuição do peso e do volume dos resíduos (Beyene *et al.*, 2018). Deve ser considerado, também, que as emissões de metano geradas pela decomposição anaeróbia dos RS nos lixões, aterros controlados ou aterros sanitários podem ser mais prejudiciais do que aquelas geradas pelos WTEs, favorecendo à redução do aquecimento global (Baird, 2011). Nesse contexto, a recuperação energética pela incineração se apresenta como uma vantagem associada a estas outras, de acordo com Sebastião *et al.* (2019), oferecendo efeito sinérgico positivo na utilização desta tecnologia. Outros aspectos ambientais, econômicos e sociais causados pela WTE precisam ser consideradas para que a mesma seja utilizada com sucesso.

Dos resíduos considerados para a queima estão incluídos apenas os de papel, papelão, plásticos, têxteis, rejeitos diversos e materiais orgânicos totalizando 92,2 %, conforme apresentado na Tabela 5. Os 7,8% restantes correspondem a outros materiais os quais não são apropriados para a queima, como pilhas, baterias e metais. Quanto a viabilidade dessa tecnologia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estabelece que ela se torna tecnicamente viável quando a queima de resíduo bruto (*mass burning*) atinge valores de PCI > 2.000 kcal/kg. É importante destacar que o PCI varia significativamente com a umidade. Neste sentido, torna-se indispensável acompanhar durante toda a época do ano, com precisão, o percentual de umidade nos resíduos utilizados.

6.5 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E POTÊNCIA OBTIDOS

A partir das equações (2) e (3), das quantidades médias dos resíduos gerados no município e do seu PCI foi feita a estimativa da capacidade de processamento e incineração

(Qt), em toneladas por hora de operação, da usina e o valor da potência térmica (Pt) gerada.

6.5.1 Capacidade de processamento e incineração da usina.

$$Qt \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = 108.936 \text{ t.ano}^{-1} / 4320 \text{ h.ano}^{-1} = 25,22 \text{ t.h}^{-1}$$

6.5.2 Potência térmica a ser gerada

$$Pt \text{ (MWt)} = 25,22 \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times 9117 \text{ (kJ/kg)} \times (1 \text{ h}/3.600 \text{ s}) \times (1000 \text{ kg/t}) = 63,9 \text{ MWt}$$

6.5.3 Potência elétrica do gerador

Para a potência elétrica (Pe) do gerador, foi utilizada a eq. (4).

$$Pe \text{ (MWe)} = 63,9 \text{ MWt} \times 30 \% = 19,2 \text{ MWe}$$

Para o município, foi estimada a obtenção potência elétrica de 19,2 MW sendo que, para o funcionamento da própria usina, é necessário considerar um consumo médio entre 60 % e 70 % da energia produzida. Assim, a Pe que pode ser disponibilizada na rede corresponde ao valor de 6,72 MWe.

6.5.4 Potência elétrica mensal disponibilizada na rede

Também foi calculada a potência elétrica (Pe mensal) que pode ser disponibilizada, na unidade de kWh, conforme eq. (5).

$$Pe \text{ mensal (kWe/mês)} = 6720 \text{ (kWe)} \times 360 \text{ (h/mês)} = 2.419.200 \text{ kWh/mês.}$$

Conforme dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a demanda média de energia de cada residência no município corresponde a 166,7 kWh/mês. Desta maneira, estima-se que a usina teria capacidade de suprir a energia elétrica de, aproximadamente, 14.512 residências do município.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos parâmetros de potência e seus respectivos valores obtidos na etapa de dimensionamento do Sistema WTE e geração de energia.

Tabela 6: Parâmetros de operação e potência para a usina WTE

Capacidade de Processamento e Operação (t.h ⁻¹)	Potência elétrica gerador (MWe)	Potência elétrica na rede (MWe)	Potência elétrica mensal disponível (kWh/mês)
25,22	19,2	6,72	2.419.200

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS DA PROPOSTA

7.1 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL

As áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos de forma geral são fontes de geração de efluentes líquidos e gasosos, os quais precisam de monitoramento contínuo e tratamentos específicos, geralmente por períodos superiores ao triplo do tempo que o aterro recebeu resíduos (EPE, 2018). É possível afirmar que a poluição do local de destinação final é o principal problema provocado pelos resíduos sólidos. As regiões vizinhas às áreas utilizadas perdem atratividade para o uso comercial e residencial, e sua desvalorização afeta principalmente a população de baixa renda (Bendito *et al.*, 2017).

Os principais problemas causados pela poluição são o mau cheiro, a presença de animais que funcionam como vetores de doenças, os riscos de explosão devido a formação de gás metano e o elevado potencial de poluição do solo e de contaminação do lençol freático (Bendito *et al.*, 2017).

7.1.1 Gases de Efeito Estufa gerados pelos resíduos sólidos

Conforme *United States Environmental Protection Agency* (EPA), são quatro as principais formas de relacionar os resíduos sólidos com o efeito estufa (EPA, 2017): a) emissão de dióxido de carbono (CO₂) decorrente do consumo de energia para extração dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados); b) emissão de CO₂ oriunda do consumo não energético de combustíveis no processo de produção de bens; c) emissão de metano (CH₄) devido a decomposição de restos de alimentos depositados nos aterros sanitários; e d) fixação de carbono das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários. Também pode-se considerar como uma quinta relação a emissão de CO₂ devida ao transporte de resíduos, desde a coleta até a destinação final.

A decomposição de resíduos nos aterros sanitários gera emissões compostas por CH₄ (45-60%), CO₂ (40-60%), nitrogênio (2,5%) e, em quantidades <1% por dezenas de contaminantes orgânicos e inorgânicos conhecidos pela sigla NMOC (*non-methane organic compounds*) que incluem benzeno, tolueno, organoclorados, mercúrio e organometálicos. Embora relativamente constantes em termos de composição química, as emissões variam tanto na velocidade de produção quanto na quantidade produzida ao longo do tempo de deposição em função de fatores climáticos, forma de deposição e da própria composição de rejeitos (EPE, 2008; Rezende, 2015).

Conforme Resende (2015), no mundo todo os aterros sanitários produzem entre 20 e 60x10⁶t/ano de CH₄ como resultado direto da decomposição orgânica de lixo, evidenciando

que mesmo nos aterros sanitários, considerados como a melhor solução para os resíduos sólidos, as emissões de gases de efeito estufa são elevadas, principalmente nos primeiros anos de operação.

Além disso, a decomposição de componentes orgânicos presentes no lixo gera um efluente líquido conhecido como chorume, que é potencial contaminador do lençol freático e capaz de provocar danos consideráveis ao ecossistema quando encaminhado a rios e lagos existentes nas vizinhanças (EPE, 2014).

Neste sentido, a proposta da incineração de resíduos para redução de volume e disposição final de rejeitos, além da possibilidade de produção de energia elétrica adicional, contribui para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e do chorume para aterros sanitários, além de substituir parte da energia gerada a partir de fontes fósseis (EPE, 2014).

7.1.2 Créditos de Carbono e incineração de resíduos

O mercado de carbono existe no mundo todo e é regulado em cada país por uma legislação, como é o caso do Brasil, que o regulamenta por meio do Decreto nº 5.882 de 2006. Basicamente, o mercado de carbono é caracterizado pela venda dos créditos de carbono entre um país que os detém, ao ter reduzido sua emissão de dióxido de carbono, e um país que precisa diminuir suas emissões, mas não atingiu suas metas. A comercialização é feita segundo os modos do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), um dos mecanismos de flexibilização resultante do Protocolo de Kyoto que permite a cooperação entre países industrializados e países em desenvolvimento.

É possível gerar crédito de carbono por meio da preservação florestal, do reflorestamento, do investimento em projetos verdes, como usinas solares e eólicas. Também é possível por meio da produção de biocombustíveis e biogás, e pela queima equivalente de metano, mediante a utilização de novas tecnologias.

Com base na proposta da implementação do sistema *Waste-to-energy* analisado, é possível estimar as receitas obtidas a partir da produção de energia elétrica pela incineração total de resíduos sólidos e os créditos de carbono gerados. Segundo o último informe do Banco Mundial (2022), o preço médio global dos créditos de carbono voluntário passou de US\$ 2,49/tCO₂ em 2020 a US\$ 3,82/tCO₂ em 2021, devido principalmente ao aumento da demanda na medida em que os esforços para a descarbonização são acelerados.

Considerando a quantidade de energia gerada pelo processo de incineração, a partir do volume total diário de resíduos sólidos disponíveis de 302,6 toneladas, tem-se o valor da receita obtida pela venda de créditos de carbono. Para fins de cálculo, foi considerado o valor atual de R\$ 19,31 por crédito de carbono, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Receitas obtidas pelos créditos de carbono da geração de energia

Volume Resíduos Sólidos (t/dia)	Créditos de carbono			Receita (x10 ⁶ R\$)
	Conversão CC (CO ₂ eq)	Diário (eq/ton)	Anual (eq/ton)	
302,6	1,3	393,38	143.583,7	2,772

1 CC = US\$ 3,82 R\$ 19,31

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Pereira et al (2018).

A partir do cálculo e os resultados mostrados na tabela 7, tem-se que a unidade de incineração é capaz de adquirir diariamente 393,38t de CO₂ equivalente, que corresponde a 143.583,7 créditos de carbono anuais, gerando uma receita anual pela sua venda na bolsa de valores de aproximadamente R\$ 2,772 x 10⁶ milhões.

7.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Para análise de viabilidade em termos financeiros é necessário definir as receitas e custos associados ao projeto. Neste sentido, deve-se conhecer previamente alguns aspectos de relevância, como o número de habitantes do local potencial de instalação da planta incineradora, número de habitantes, características dos resíduos sólidos gerados e aspectos locacionais. Como visto na análise socioambiental, são vários os cuidados que devem ser adotados para evitar a poluição dos recursos naturais, destacando a tecnologia da incineração como alternativa para contribuir neste processo.

7.2.1 Receitas.

Em termos de receitas de uma usina de incineração, podem ser mencionados dos parâmetros de importância no aporte financeiro para a obtenção de receitas, sendo estes a comercialização de energia elétrica e a venda dos créditos de carbono. As receitas referentes à comercialização de energia elétrica gerada pela usina de incineração serão calculadas conforme valor atual pago pela companhia elétrica local, de R\$ 0,59272/kWh, subclasse B1, tarifa residencial (COPEL, 2023). A receita referente aos créditos de carbono já foi calculada na seção anterior de análise socioambiental, os quais podem ser comercializados e gerar um valor adicional na receita obtida pela sua venda. A Tabela 8 a continuação apresenta o resumo das

receitas obtidas.

Tabela 8: Receitas obtidas a partir do uso do sistema de incineração proposto

Receitas		Total (x10 ⁶ R\$)
Comercialização de energia	Venda Créditos de carbono	
17,2	2,8	20,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a tabela 8, as receitas a partir da implementação da proposta de incineração de resíduos sólidos totaliza um valor aproximado de R\$ 20,0 milhões de reais anuais.

A comercialização de energia corresponde ao custo total gerado pela venda de energia produzida para abastecimento residencial. Neste ponto, é destacado que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ainda não definiu uma tarifa para a energia proveniente da incineração do lixo urbano, então, de maneira estimativa, foi adotado como sendo o valor para o consumo residencial. Cabe ressaltar que uma parte da energia produzida é utilizada no próprio processo e a outra parte é comercializada.

O funcionamento da planta de incineração também pode gerar algumas receitas adicionais, a partir da fabricação de materiais de construção provenientes das cinzas e materiais residuais, os quais são utilizados para a produção de tijolos de concretos, fabricados a partir de cinzas, areia e pedras resultantes do processo. Considerando que o processamento destes materiais requer estruturas especializadas e local de produção, não serão computados como receitas para esta análise.

7.2.2 Custos.

Para fins de organização, os custos da proposta da planta de incineração podem ser divididos em custo de investimento e custos de operação (variáveis e fixos). Em primeiro lugar, temos que os custos de investimento são aqueles referentes à implantação da usina no local definido. Dentre eles, temos o custo com a construção civil, o projeto de engenharia e o serviço de montagem industrial. Além destes investimentos, existe o investimento em equipamentos e materiais, os quais são necessários para a montagem das unidades da usina nas suas diferentes etapas de operação, sendo estas: Pré-processamento de resíduos, Incineração, Recuperação de calor, Geração de energia elétrica, Tratamento de gases e vapores. Os equipamentos auxiliares de segurança na parte elétrica e de emergência, tubulações e instrumentação são considerados

geralmente neste grupo de custos.

A localização da planta também deverá ser levada em consideração, a partir da compra de uma área específica para o recebimento dos resíduos sólidos e a sua posterior incineração na usina instalada. Neste quesito, deverão ser consideradas a prospecção da proposta mediante a formação de equipes para tratativa com fornecedores de equipamentos, estudos preliminares sobre resíduos, elaboração de projeto básico (protótipo), entre outros. O custo dos estudos ambientais, mecânico, elétrico e civil também deve ser considerado. A obtenção das licenças ambientais nas suas diversas etapas, assim como o pagamento de taxas e elaboração de relatórios deve ser contemplado.

Por outra parte, tem-se os custos com equipamentos propriamente, como o secador, caldeira, turbina, gaseificador, entre outros. O local para recebimento dos resíduos deve ser construído, no caso o galpão, pois os resíduos não podem ficar expostos a céu aberto, devido ao requerimento técnico de umidade reduzida.

Os custos de manutenção da planta incineradora também serão considerados, pois a eficiência na queima de resíduos e geração de energia está associada diretamente à realização de manutenções frequentes e programadas.

Finalmente, para o funcionamento eficiente da planta, deve ser considerado o custo referente ao gás natural que é utilizado como combustível auxiliar no processo de incineração dos resíduos. Na tabela 9 do Anexo I, são detalhados os itens de acordo com o tipo e os respectivos custos associados.

7.2.3 Análise de investimento e parâmetros econômicos.

Para o sistema de incineração e aproveitamento energético de resíduos proposto, o investimento inicial requerido corresponde a um total de R\$ 45.136.500, respectivamente. A montagem do fluxo de caixa foi realizada considerando o cálculo prévio da Taxa Mínima de Atratividade (TMA), a partir da composição média entre a poupança líquida e a inflação nos últimos 10 anos no Brasil, resultando no valor de 11,73% ao ano.

Logo, a partir da taxa obtida, o fluxo de caixa foi montado para o cálculo dos parâmetros socioeconômicos, conforme detalhado no Anexo II, resultando em valores positivos para o sistema proposto, obtendo uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 32,0% a.a. e valores para o Valor Presente Líquido (VPL), Índice Benefício-Custo (IBC), Taxa Média de Retorno (TMR) e Payback Simples favoráveis. Os parâmetros de decisão econômica são dados a seguir, cujo detalhamento sobre equações utilizadas se encontram no Anexo III.

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 65.789.424,68$$

TIR = 32,0% a.a

IBC = 1,46

TMR = 32,35% a.a

PAYBACK SIMPLES = 3 anos, 1 mês

PAYBACK DESCONTADO = 4 anos, 2 meses.

A Figura 20 apresenta o gráfico de barras e segmento linear demonstrando os retornos de investimento realizado ao longo do tempo para a implantação do sistema de incineração. É possível observar o comportamento crescente e gradual no período anual, indicando um aumento permanente para a recuperação do investimento inicial realizado.

Figura 20: Payback (Tempo de Retorno de Investimento) da proposta analisada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A interseção das linhas vermelhas no círculo amarelo representa o tempo exato de recuperação do capital investido conforme analisado previamente e demonstrado a partir do fluxo de caixa e parâmetros econômicos analisados, a partir do qual foi definido um tempo equivalente a 4 anos e 2 meses necessários para o pagamento da inversão inicial e posterior a este, a obtenção de lucros com a proposta realizada.

8 CONCLUSÕES (CONSIDERAÇÕES FINAIS)

Existe um potencial realmente interessante que pode ser aproveitado mediante a gestão adequada dos resíduos sólidos e a implementação de metodologias de processamento e recuperação energética, como a incineração, mediante a proposta do método Waste-to-energy.

O município de Foz do Iguaçu, tem a característica de ser uma cidade turística e fronteiriça, recebendo um número elevado de pessoas de diversas regiões do mundo, sendo que isto traz particularidades específicas, principalmente na questão da geração e acúmulo de resíduos. Além dos resíduos gerados nas residências é produzida uma grande quantidade de matéria orgânica, proveniente de restaurantes e hotéis, as quais são atualmente destinadas ao aterro sanitário para o seu tratamento e disposição final. É necessário propor e estudar a viabilidade técnica e econômica de uma alternativa para contribuir no processo de gestão ambiental que permita colaborar estrategicamente no aproveitamento do volume crescente de resíduos, mediante a adoção de tecnologias amplamente utilizadas em países desenvolvidos do mundo, os quais apontam a reduzir os impactos sociais, ambientais e econômicos gerados pela gestão ineficiente dos resíduos gerados e ao mesmo tempo brindar uma utilidade a aqueles materiais que são desperdiçados nos aterros, gerando energia elétrica para a comunidade mediante o processo de cogeração de energia, que traz muitos benefícios evitando a degradação de áreas e os impactos causados na fauna e flora, respectivamente.

A etapa de destinação final dos RS ainda representa um grande desafio para as gestões municipais, considerando a tendência no aumento gradual do volume de geração *per capita*. A tecnologia de incineração WTE apresenta vantagens quanto a redução de massa e volume do resíduo descartado, a possibilidade de recuperação de energia, eliminação de vírus e bactérias, destruição completa ou parcial das substâncias tóxicas, como também contribuindo na diversificação dos processos de destinação final de RS. Os resultados obtidos mostram que é possível gerar uma potência elétrica mensal entorno dos 2.419.200 kWh/mês a partir da incineração dos resíduos, os quais serão capazes de suprir a demanda de energia elétrica de aproximadamente 14.512 residências no município de Foz do Iguaçu. A tecnologia WTE evita também que os rejeitos sejam dispostos nos lixões e aterros sanitários, sendo que cada tonelada não destinada, equivale a créditos de carbono gerados, os quais trazem um lucro anual equivalente a R\$ 2,77 milhões pela sua comercialização. No entanto, a tecnologia traz alguns aspectos que precisam de atenção e análise, como aqueles referentes aos custos de investimentos iniciais, a exigência de mão de obra especializada e a necessidade de tratamento dos resíduos gerados na combustão (emissão atmosférica de poluentes). Neste sentido, deve ser

considerada que as emissões de metano geradas pela decomposição anaeróbica dos resíduos nos lixões e aterros são mais prejudiciais que as emissões injetadas pelos WTEs, favorecendo à redução do aquecimento global.

A análise econômica a partir da montagem do fluxo de caixa permitiu o cálculo dos parâmetros socioeconômicos, resultando em valores positivos para o sistema proposto, obtendo o Valor Presente Líquido (VPL) igual a R\$ R\$ 65.789.424,68, a Taxa Interna de Retorno (TIR) sendo 32,0 % a.a, Índice Benefício-Custo sendo 1,46, a Taxa Média de Retorno (TMR) de 32,35% a.a, assim como um Payback Simples de 3 anos e 1 mês, que corresponde ao tempo necessário para a recuperação do dinheiro inicial investido para a execução e implantação do projeto proposto.

Desta forma, mediante a análise econômica, foi verificada a viabilidade favorável em termos financeiros para a adoção da tecnologia proposta como sistema de tratamento e destinação final de resíduos sólidos no município de Foz do Iguaçu, destacando esta alternativa como uma estratégia para aumentar o tempo de vida útil do aterro sanitário, contribuindo principalmente com a redução do volume total de resíduos, trazendo como resultados a geração de lucros socioambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.175: Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos**. Rio de Janeiro: 1990.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: 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.
- ABRELPE-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo, 2022.
- ALAGOAS. **Recuperação Energética. Resíduos Sólidos de Alagoas (RSA)**. Disponível em: <<http://www.residuossolidos.al.gov.br/sistemas/recuperacao-energetica>> Acesso em: 26 mai. 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. São Paulo: Artmed, 2011.
- BENDITO, P.; De Souza PA, Picanço AP, Da Silva RR, Siebeneichler SC. **Diagnóstico da degradação ambiental na área de depósito inadequado de resíduos sólidos de Porto Nacional - TO**. *Gaia Scient.* 2017, 11: 129-151.
- BRASIL. Congresso. Senado. Constituição (2010). 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**. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/tpFo>>. Acesso em: 02 mai. 2023.
- CATVE. **Sistema de tratamento de chorume usando osmose reversa no aterro de Foz do Iguaçu**. Disponível em: <https://catve.com/noticia/6/264647/>. Acesso em: 28 dez. 2023.
- CASTRO, J. N. C.; NASCIMENTO, N. **Reciclagem: mais que um simples dever, uma grande necessidade**. In: Jornada de Iniciação Científica e Pós-Graduação, Guaratinguetá - 2002;
- 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.
- CHI, Y.; **Waste-to-Energy in China**. ZHE JIANG UNIVERSITY. 22-23 Feb. 2017, Busan,

Korea Expert Group Meeting on Sustainable Application of Waste-to-Energy in Asian Region. 2017.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT, S. D. **Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste**, Applied Energy, 1997.

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.

ECOPROG, 2019. Waste to Energy 2019/2020. **Technologies, plants, projects, players and backgrounds of the global thermal waste treatment business**. 12° edição 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022 - ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

ENERGY Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW). [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <<http://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw#why>> . Acesso em: 15 dez. 2023.

EPA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Waste-to-energy Overview**. Disponível em: <https://www.epa.gov/waste-to-energy>. Acesso em: 17 dez. 2023.

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

_____ - EPE. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

ESWET –European Suppliers of Waste-to-Energy Technology. Waste-to-Energy in Europe in 2023. Disponível em: <https://eswet.eu/waste-to-energy-the-city-generating-value-for-cities/>. Acessado em: 15 de dezembro de 2023.

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

GUATTA, A. **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. Universidade Tecnológica Federal do

Paraná. Campo Mourão, 2021.

HAUSER, P. D.; **Criação de Valor e Desenvolvimento Sustentável: uma Avaliação da Incineração de Resíduos Sólidos Municipais em Projetos Enquadráveis no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto**. Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://goo.gl/XGf3AG>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

IPT, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado**, 1998, São Paulo.

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.

JARDIM, N. Z. et al. **O Gerenciamento Integrado do Lixo Municipal. In: CEMPRE - Compromisso Empresarial Para a Reciclagem**. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 4ta. ed. São Paulo, 2018. cap.1, p. 3-26.

LIMA, L.M.Q. **Tratamento de Lixo**. São Paulo: Hemus, 2^a ed., 1991.

MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor. **Impactos Ambientais da Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos no solo e na água superficial em três municípios de Minas Gerais**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/Y2b9sg>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

MENEZES, R. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. **Estágio atual da incineração no Brasil**. Rio de Janeiro: GRUPO KOMPAC, 2000.

MILANEZ, B.; MASSUKADO, L. M. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. IPEA – Instituto de Pesquisa de Economia Aplicada. Brasília, 2012.

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.

NATIONAL Data: **National Bureau of Statistics of China**. [S. 1.], 2020. Disponível em: . Acesso em: 16 dez. 2023.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

ONAISSI, N., Lixo pode ser revertido em energia e créditos de carbono, em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, 2006. Disponível em <<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/?id=118859>>, Acesso em: 20 abr. 2023.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná**, Paraná, Curitiba, 2017.

PARANÁ. Companhia Paranaense de Energia Elétrica. **Taxas e tarifa de energia elétrica no Estado do Paraná**. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/#>. Acesso em: 19 dez. 2023.

PAVAN, M. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. Tese de Doutorado em Energia. USP: São Paulo, 2010

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 FOZ DO IGUAÇU – PR, Secretaria de Meio Ambiente. **Programa de Gestão Integrada de Resíduos Recicláveis**. Foz do Iguaçu, 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU – PR, Secretaria de Meio Ambiente. **Resumo mensal e anual de Visitação de atrativos 2019-2023**. Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <<https://www.destino.foz.br/membros/visitacao-de-atrativos-resmumo-mensal-a-partir-de-2019/>> Acesso em: 13 de dez. de 2023.

PREFEITURA DE FOZ DO IGUAÇU – PR, **Plano Municipal de Saneamento Básico, 2012**. Disponível em: <<http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1664c.pdf>> Acesso em: 10 de abr. de 2023.

Rezende AGOB. **Avaliação do Potencial Energético e Econômico do Tratamento, Destinação e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. Tese. Universidade Federal de São João del Rei. Brasil, 2015. 165 pp.

Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2011). **Separation Process Principles**. John Wiley & Sons.

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. 2023.

SILVA, C.L., **Tratamento Térmico de Resíduos**, FEB - DEM UNESP, 1998.

SLATER, D. **Cultura do consumo e modernidade**. Editora Nobel. São Paulo: 2002. Online. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Au3OR-g0xCYC&pg=PA32&dq=sociedade+moderna+de+consumo&hl=pt-BR&ei=JU-tTvX3CsTy0gG8ke2CDw&sa=X&oi=book_result&ct=result#v=onepage&q=sociedade%20moderna%20de%20consumo&f=false> Acesso em: 30 abr. 2023.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. 1ª Ed. Interciência. Rio de Janeiro: 2003.

TOMAZ E., **Tratamento de Rejeitos Sólidos**, Apostila do curso e Engenharia Ambiental, Unicamp, 2.001.

VAN C. et al., 2012. **Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues**. Progress in Energy and Combustion Science. Heverlee, Bélgica.

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.

VITAL ENGENHARIA AMBIENTAL S/A. **Informações repassadas pela empresa sobre os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos no município de Foz do Iguaçu**, 2019.

WORRELL, E., & VESILIND, P. (2012). **Solid Waste Engineering: A Global Perspective**. Cengage Learning.

ANEXO I

Investimento Inicial – Custos para implantação da Usina de Incineração

Tabela 9: Custo de investimento e operação da planta de incineração de resíduos

PROSPECÇÃO					
Etapa	Item	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)	Valor Total (U\$)
Inicial	Criação de empresa LTDA	1	1.500	1.500	300
Inicial	Formação de equipe	1	500.000	500.000	100.000
Inicial	Viagem para conhecer fornecedores	5	42.0000	210.000	42.000
Inicial	Estudos preliminares sobre resíduos	3	10.000	30.000	5.000
Inicial	Projeto básico	1	500.000	500.000	100.000
Inicial	Criação de protótipos	1	2.000.000	2.000.000	400.000
PROJETO					
Inicial	Estudos ambientais	4	300.000	1.200.000	240.000
Inicial	Elaboração de relatórios	6	20.000	120.000	24.000
Inicial	Projeto mecânico	1	400.000	400.000	80.000
Inicial	Projeto eletromecânico	1	300.000	300.000	60.000
Inicial	Projeto integrador	1	300.000	300.000	60.000
Inicial	Projeto civil	1	300.000	300.000	60.000
LICENÇAS AMBIENTAIS					
	Estudos complementares	2	20.000	40.000	8.000
	Elaboração de relatórios	5	20.000	100.000	20.000
	Taxas de Licença Prévia	1	30.000	30.0000	6.000
Inicial	Taxas de Licença de Instalação	1	20.000	20.000	4.000

Inicial	Taxa de Licença de Operação	1	20.000	20.000	4.000
EQUIPAMENTOS					
Intermédia	Secador de resíduos	1	300.000	300.000	60.000
Intermédia	Caldeira	2	100.000	200.000	40.000
Intermédia	Turbina	1	300.000	300.000	60.000
Intermédia	Linha de CDR (300 t/dia) *	1	2.265.000	2.265.000	525.000
Intermédia	Central de comando	1	90.000	90.000	18.000
Intermédia	Ponte rolante	1	80.000	80.000	16.000
ÁREA DO TERRENO					
Inicial	Valor do Terreno	1	10.000.000	10.000.000	2.000.000
CONSTRUÇÃO CIVIL					
Inicial	Fundação	1	300.000	300.000	50.000
Intermediária	Galpão de armazenamento de resíduos	2	800.000	1.600.000	320.000
Intermediária	Pavimentação	1	4.000.000	4.000.000	800.000
Intermediária	Sistema de Transmissão e Distribuição	1	20.000.000	20.000.000	4.000.000
MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS					
Operação	Manutenção corretiva e preventiva	Mensal/Anual	5.400.000	5.400.000	1.080.000
COMBUSTÍVEL AUXILIAR					
Operação	Compra de gás natural	Anual	7.949.160	7.949.160	1.589,83
INVESTIMENTO INICIAL			45.136.500		
CUSTO ANUAL (VIDA ÚTIL = 20 anos)			5.400.000		

Fonte: Elaborado pelo autor

*CDR: Combustível derivado de resíduo

Taxa de câmbio: R\$ 5,00 (dezembro 2023)

ANEXO II

Tabela 10: Fluxo de caixa para análise econômica da proposta

FLUXO DE CAIXA				
ANO	Fluxo de Caixa Final	Fluxo de Caixa Acumulado	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Descontado Acumulado
0	-45.136.500	-45.136.500	-45.136.500	-45.136.500
1	14.600.000	-30.536.500	13.067.215,61	-32.069.284,39
2	14.600.000	-15.936.500	11.695.350,94	-20.373.933,45
3	14.600.000	-1.336.500	10.467.511,81	-9.906.421,639
4	14.600.000	13.263.500	9.368.577,65	-537.843,9893
5	14.600.000	27.863.500	8.385.015,349	7.847.171,36
6	14.600.000	42.463.500	7.504.712,566	15.351.883,93
7	14.600.000	57.063.500	6.716.828,574	22.068.712,5
8	14.600.000	71.663.500	6.011.660,766	28.080.373,27
9	14.600.000	86.263.500	5.380.525,164	33.460.898,43
10	14.600.000	100.863.500	4.815.649,48	38.276.547,91
11	14.600.000	115.463.500	4.310.077,401	42.586.625,31
12	14.600.000	130.063.500	3.857.582,924	46.444.208,23
13	14.600.000	144.663.500	3.452.593,685	49.896.801,92
14	14.600.000	159.263.500	3.090.122,335	52.986.924,25
15	14.600.000	173.863.500	2.765.705,124	55.752.629,38
16	14.600.000	188.463.500	2.475.346,929	58.227.976,31
17	14.600.000	203.063.500	2.215.472,057	60.443.448,36
18	14.600.000	217.663.500	1.982.880,208	62.426.328,57
19	14.600.000	232.263.500	1.774.707,069	64.201.035,64
20	14.600.000	246.863.500	1.588.389,035	65.789.424,68

ANEXO III

Tabela 11: Parâmetros de decisão econômica da proposta

Parâmetros de decisão econômica	
Parâmetros	Valores
VPL	R\$ 65.789.424,68
TIR	32,0% a.a.
IBC	1,46
TMR	32,35% a.a.
PAYBACK SIMPLES	3 anos, 1 mês
PAYBACK DESCONTADO	4 anos, 2 meses

TMA: 11,17% a.a

Período: 20 anos

Equações para cálculo de parâmetros econômicos

Valor Presente Líquido

$$VPL = \sum \frac{C_d}{(1+TMA)^t} (\pm C_o)$$

Taxa Interna de Retorno

$$TIR = \sum \left[\frac{F_{ct}}{(1+t)^t} \right] - I_o = 0$$

Índice Benefício-Custo

$$IBC = \sum \frac{C_d}{(1+TMA)^t} / C_o = \frac{\text{Somatório do valor presente de todos os fluxos de caixa futuro}}{\text{Investimento inicial}}$$

 C_o = Valor de investimento inicial; C_d = Lucros por cada período;

$$TMR = \frac{\text{Fluxo de caixa médio}}{\text{Inversão média}}$$